

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

par
MARCEL DANIEL EPANYA

APPLICATION DU FILTRAGE ACTIF POUR UNE MISE EN ŒUVRE DE
MÉTHODE DE PRÉDICTION ET DE CONTRÔLE D'HARMONIQUES DANS UN
RÉSEAU DE DISTRIBUTION ÉLECTRIQUE

SEPTEMBRE 2010

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

Résumé

Les charges non linéaires résidentielles, commerciales et industrielles raccordées au réseau de distribution d'énergie électrique tirent des courants non sinusoïdaux. Ces courants, en traversant les liaisons (lignes, transformateurs) provoquent l'apparition de tensions non sinusoïdales dans le réseau ; provoquant à leur tour des courants non sinusoïdaux, bien souvent au désagrément du reste des charges connectées. En effet, les harmoniques de courant et de tension altèrent le fonctionnement de l'appareillage électrique, réduisent les performances du réseau et causent des bris de composants. La qualité de l'onde devient ainsi une exigence à respecter tant par le distributeur d'électricité que par le consommateur. Il est nécessaire de limiter la propagation des harmoniques de courant et de réduire les déformations des tensions du réseau.

L'objectif de ce travail est d'évaluer les harmoniques de courant et de tension causés par des charges non linéaires et de proposer des méthodes pour contrer la propagation des harmoniques de courant et réaliser ainsi la réduction des harmoniques de tension.

Le chapitre 1 présente, les principales formulations des équations pour l'étude de l'écoulement de puissances avec prise en compte progressive des harmoniques. Un exemple numérique y faisant suite est donné en annexe .1. La théorie générale sur les harmoniques ; l'onde et ses caractéristiques, y est abordée à la lumière des études antérieures. Le chapitre 2 concerne une analyse théorique des méthodes d'élimination d'harmoniques exposées dans la littérature. On y trouve aussi la réglementation sur la pollution par les harmoniques. Le chapitre 3 propose l'étude du filtre actif parallèle, et le chapitre 4 expose une application du

filtrage par des simulations, respectivement avec le filtre passif composé d'un groupement de deux circuits résonant série, seul branché sur le réseau ; puis avec le filtre actif parallèle tout seul branché sur le réseau, et enfin avec le filtre hybride. Le chapitre 5 apporte une conclusion sur l'ensemble du travail réalisé.

Remerciements

Mes remerciements vont à tous ceux qui de près ou de loin m'auront soutenu pour la réalisation de ce travail. Je nommerai au premier chef mon Directeur, le Professeur Mamadou Lamine Doumbia, pour tout le soutien qu'il m'a toujours apporté de manière informelle ou didactique. Le Professeur Anatole Sévigny pour m'avoir donné l'opportunité de me lancer dans ce sujet, sans oublier les Professeurs Kodjo Agbossou pour son appui au moment nécessaire. Le Professeur Ahmed Chériti, pour le temps et l'attention qu'il aura disposé de tout cœur pour le succès de ce travail ; et le Professeur Ahmed Chebak de l'Université du Québec à Rimouski qui malgré la distance a répondu positivement à l'évaluation de travail. Je réserve un merci tout particulier à mes collègues et amis Adegnon Kokou Mattewu et Cardenas Gonzalez Alben pour l'efficacité de leurs conseils et surtout pour le temps qu'ils m'ont tout le long accordé. Je veux remercier en dernier ressort le Professeur Benachaiba Chellali de l'Université de Bechar en Algérie, grâce à qui mon travail a pris une sérieuse orientation. Et sous ce même angle je vais citer tout le laboratoire « Qualité d'onde », principalement Brahim Naït-Kaci, Abdelrahman Yousif et Baldé Mamadou.

Je ne saurais remercier mon épouse Monique, qui aura tant enduré mes absences et autant comblé d'amour nos deux enfants, Florent et Rosalie. En dernière ligne c'est à JEHOVAH Mon DIEU que revient toute ma gratitude.

Table des matières

Résumé	i
Remerciements	iii
Table des Matières	iv
Table des Figures	vii
Liste des Tableaux	x
Liste des Symboles	xii
1 Introduction Générale	1
1.1 Problématique	1
1.2 État de l'Art	2
1.2.1 Introduction	2
1.2.2 Formulation des Équations pour l'Étude de l'Écoulement de Puissance dans les Réseaux Électriques	3
1.2.3 Méthodes d'Élimination des Harmoniques	14
1.2.4 Caractéristiques de l'Onde	15
1.2.5 Sources des Harmoniques	20
1.2.6 Les Effets des Harmoniques	21

1.2.7	La Réglementation sur la Pollution Harmonique	25
1.3	Objectifs	25
1.4	Structure du Mémoire	26
1.5	Contribution	26
1.6	Conclusion	27
2	Méthodes pour Contrer les Harmoniques	28
2.1	Introduction	28
2.2	Solutions Traditionnelles	30
2.2.1	Protection du Conducteur de Neutre	30
2.2.2	Inductance de Lissage	30
2.2.3	Action sur l'Impédance Harmonique de la Source	31
2.2.4	Action sur la Structure de l'Installation	31
2.2.5	Utilisation de Transformateurs à Couplages Spécifiques	32
2.3	Filtrage Passif	34
2.4	Filtrage Actif	37
2.5	Conclusion	42
3	Filtre Actif Parallèle : Structure, Étude et Stratégie de Commande	44
3.1	Introduction	44
3.2	Structure et Stratégie de Commande	45
3.2.1	Étude de la Partie Puissance	45
3.2.2	Étude de la Partie Commande	51
3.3	Conclusion	61
4	Étude Comparative par Simulation	62
4.1	Introduction	62
4.2	Présentation des Montages sous Simulink et Résultats de Simulation	63

4.2.1	Étude sans Filtre	65
4.2.2	Étude avec Filtre Passif	66
4.2.3	Étude avec Filtre Actif	68
4.2.4	Étude avec Filtre Hybride	68
4.2.5	Étude pour une Charge RC	69
4.2.6	Utilisation d'un Filtre d'Entrée de Deuxième Ordre (de Type LCL)	69
4.3	Conclusion	72
5	Conclusion Générale	74
	Bibliographie	76
	Annexes	81
.1	Étude de l'Écoulement de Puissance par la Méthode Itérative de Gauss- Seidel ainsi que par la Méthode de Newton-Raphson	81
.2	Norme IEEE Standard 519	93
.3	Critères sur les Filtres Anti-Harmoniques (Typique à Schneider Electric) .	93

Table des figures

1.1	Diagramme HP, [1]	6
1.2	Bloc Diagramme IHP, [1]	8
1.3	Bloc Diagramme SHLF, [1]	10
1.4	Onde Déformée	15
1.5	Modélisation du Réseau et de la Charge	18
1.6	Courant du Neutre	24
2.1	Forme d'Onde Contenant une Harmonique de Rang 3 (Courant de Magné- tisation des transformateurs)	29
2.2	Une Installation d'Inductance de Lissage	30
2.3	Ajout d'une Inductance en Aval ou Diminution de l'Impédance de Source en Amont	31
2.4	Connexion à Éviter	32
2.5	Connexion Requise	32
2.6	Mode de Connexion des Enroulements ZIG-ZAG	33
2.7	Transformateur à Secondaire ZIG-ZAG et Atténuation des Harmoniques de Rang 3k, [2]	33
2.8	Types de Filtres Passifs	34
2.9	Filtre Passif Résonant et Variation de Z en Fonction de la Fréquence	35
2.10	Filtre Passif Amorti et Variation de Z en Fonction de la Fréquence	36

2.11 Filtre Actif Série	38
2.12 Filtre Actif Parallèle à Structure de Courant	39
2.13 Filtre Actif Parallèle à Structure de Tension	39
2.14 Combinaison Active Parallèle-Série (UPQC)	40
2.15 Structure Hybride Parallèle	41
2.16 Structure Hybride (Série-Parallèle)	41
2.17 Structure Hybride (Parallèle-Série)	42
3.1 Structure Générale du Filtre Actif Parallèle	45
3.2 Onduleur de Courant Triphasé	46
3.3 Onduleur de Tension Triphasé	47
3.4 Filtre Actif Parallèle de Type Tension	50
3.5 Onduleur de Tension avec Filtre LCL	51
3.6 Forme d'Onde de Courant et de Tension pour une Commande par Hystérésis	52
3.7 Représentation Schématique du Principe de la Commande par Hystérésis .	53
3.8 Représentation schématique de la commande par MLI	54
3.9 Schéma du Principe de la Régulation de la Tension Continue	56
3.10 Simulation sur la Tension Continue	57
3.11 Gains du filtre de Butterworth passe-bas d'ordre 1 à 5. La fréquence de coupeure est normalisée à 1 rad/s. Le gain est normalisé à 0 dB dans la bande passante [3]	59
3.12 Schéma Bloc d'Implantation de l'Algorithme	60
3.13 Schéma Bloc du Diagramme Hystérésis des Courants de Référence et de Ligne	60
4.1 Schéma Unifilaire du Montage avec Filtre Hybride	63
4.2 Résultat des Simulations du Réseau avec Filtrage et Sans Filtrage	64
4.3 Schéma Bloc du Réseau Simulé sans Filtre	66
4.4 Schéma Bloc du Réseau Simulé avec Filtre Passif	67

4.5	Schéma Bloc du Réseau Simulé avec Filtre Actif	68
4.6	Schéma Bloc du Réseau Simulé avec Filtre Hybride	69
4.7	Résultat des Simulations pour une Charge RC et un Filtre LCL	70
4.8	Schéma Unifilaire du Réseau avec une Charge RC	71
4.9	Schéma Unifilaire du Réseau avec une Charge RC et un Filtre d'Entrée de Type LCL	71
1	Schéma unifilaire de réseau sous le logiciel Power Word	81

Liste des tableaux

1.1	Données et Variables de Calcul en CLF, [1]	3
1.2	Données et Variables de Calcul en HP, [1]	6
1.3	Données et Variables de Calcul en IHP, [1]	9
1.4	Données et Variables de Calcul en SHLF, [4]	11
1.5	Données et Variables de Calcul en CHLF _F , [1]	12
1.6	Données et Variables de Calcul en CHLF _H , [1]	13
1.7	Influence de l'Impédance de Source	21
1.8	Charges Polluantes et Spectres de Courants Absorbés, [5]	22
3.1	Courant de Sortie de l'Onduleur	46
3.2	Tensions de Sortie de l'Onduleur de Tension	49
3.3	Paramètres de Simulations	56
4.1	Caractéristiques du Montage	65
4.2	Paramètres de Simulation pour la FFT	65
4.3	Tableau Récapitulatif des Taux de Distorsion Harmonique	72
1	Réseau :	82
2	Bus PQVD :	82
3	Limites de Distorsions de Tension	93
4	Limites de Distorsion de Courants Harmoniques	94

5	Critères sur les Filtres Harmoniques	94
---	--	----

Liste des Symboles

CLF Formulation Conventionnelle (Conventional load flow).

NR Newton-Raphson.

NLD Nonlinear device.

HP Infiltration des harmoniques (Harmonic penetration).

CLFm Formulation conventionnelle modifiée (Conventional load flow modified).

VN Méthode des tensions aux nœuds (Voltage nodes method).

IHP Infiltration Itérative des Harmoniques (Iterative harmonic penetration).

IHA Analyse Itérative des Harmoniques (Iterative harmonic analysis).

GS Gauss-Seidel.

SHLF Formulation Simplifiée (Simplify harmonic load flow).

HA Analyse des Harmoniques (Harmonic analysis).

CHLFF Complete harmonic load flow (fundamental).

CHLFH Complete harmonic load flow (harmonic).

FAP Filtre actif parallèle

CEI Commission Électrotechnique Internationale

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

UPQC Unified Power Quality Conditioner

Chapitre 1

Introduction Générale

1.1 Problématique

La technologie des semi-conducteurs a beaucoup évolué ces dernières décennies, apportant de réelles améliorations dans les industries pour la production, de même que des éléments de satisfaction quant à la société de consommation. Ainsi, l'utilisation des appareils électroniques est devenue très courante de nos jours. On peut citer par exemple le domaine des industries où l'on rencontre des convertisseurs de fréquence, ou encore le domaine domestique où l'on a l'occasion de rencontrer un nombre considérable de postes de télévision ou d'écrans d'ordinateur. Or ces appareils n'ont pas apporté que des améliorations, puisque le courant qu'ils tirent n'est pas sinusoïdal. En effet, différentes analyses (à l'exemple de la décomposition spectrale de signaux par analyse de Fourier) [6, 7, 8] ont permis de déceler dans la composition de l'onde, non seulement la composante fondamentale désirée, mais en plus des multiples de celle-ci communément appelés harmoniques [9, 10]. Le courant ainsi pollué occasionne une tension non sinusoïdale qui peut provoquer de sérieux dommages dans le réseau de distribution.

Plusieurs travaux ont été réalisés dans le but de trouver une solution à la problématique des harmoniques [9, 11]. Parmi ceux largement reconnus comme efficaces dans les

applications. la meilleure place est jusque-là tenue par le filtrage actif des harmoniques [12]. Dans ce domaine, on distingue le filtrage passif et le filtrage actif, avec la possibilité d'une combinaison de ces deux types. Dans le cadre de ce projet de maîtrise, nous allons principalement axer notre travail sur le filtrage actif et étudier par des simulations le filtre actif parallèle en combinaison avec le filtre passif résonant.

1.2 État de l'Art

1.2.1 Introduction

L'intérêt toujours croissant suscité par le problème des harmoniques chez les spécialistes démontre l'ampleur de ce phénomène dans les réseaux électriques. Dans le but de filtrer les harmoniques, différentes études permettent aujourd'hui de comprendre non seulement leur génération et leur propagation, mais aussi de mesurer leur ampleur dans un réseau de distribution. Les travaux antérieurs sur le filtrage démontrent que, l'usage requis d'un réseau d'énergie électrique suppose la présence d'une onde de qualité acceptable, et d'une continuité dans la distribution de l'énergie. Dans l'utilisation courante connue jusqu'à nos jours, un réseau de distribution électrique sur son standard est triphasé, de courant alternatif avec une fréquence de 50Hz ou 60Hz [13].

Cependant, la qualité de l'énergie électrique dépend de celle de la tension aux points de raccordement ; de sorte qu'en branchant sur le réseau des charges dites non linéaires, la forme de l'onde de la tension cesse d'être sinusoïdale du fait que ces charges absorbent des courants non sinusoïdaux, ce qui peut entraîner des dysfonctionnements dans le réseau pour le restant des appareils connectés.

Dans cette partie, nous allons aborder les premières interprétations mathématiques du problème des harmoniques dans la littérature, les caractéristiques des courants harmoniques, le cas des sources d'harmoniques ainsi que les effets des courants harmoniques dans un réseau de distribution électrique. Puis, il sera présenté quelques éléments des normes

utilisées pour la réglementation, l'utilisation et la production de courant électrique tel qu'établis par des spécialistes.

1.2.2 Formulation des Équations pour l'Étude de l'Écoulement de Puissance dans les Réseaux Électriques

Il existe plusieurs recherches au sujet de la pollution harmonique, notamment dans le calcul de l'écoulement de puissance.

La répartition des charges dans un réseau d'énergie électrique fait appel à des calculs de l'état complet du réseau ; à savoir les courants, tensions et puissances. On distingue généralement deux types d'interprétation du problème par des équations.

Le premier type d'interprétation est la formulation conventionnelle *Conventional Load Flow* (CLF). La formulation conventionnelle fait référence à des conditions idéales de fonctionnement et à un régime établi sans l'implication des éléments pollueurs. Tout se réduisait alors au simple problème d'écoulement de puissance pure, qui détermine les conditions statiques de fonctionnement pour un réseau d'électricité.

La Formulation Conventionnelle : *Conventional Load Flow* (CLF), [1]

TABLE 1.1 – Données et Variables de Calcul en CLF, [1]

Formulation Conventionnelle (CLF)		
Éléments	Données	Inconnues
S	\underline{V}_i^1	...
PV	P_i, U_i	\underline{V}_i^1
PQ	P_i, Q_i	\underline{V}_i^1

La formulation conventionnelle (CLF) opère pour un réseau équilibré, pour déterminer les tensions fondamentales des sources et des charges du système étudié, avec une fréquence fixe (50Hz ou 60Hz).

S - Puissance apparente en voltampère (VA)

PV- Puissance active en Watt (W)

PQ - Puissance réactive en voltampère réactif (VAr)

La résolution numérique des équations non linéaires qui découlent des éléments du tableau 1.1 est faite généralement au moyen de l'algorithme de Newton-Raphson [14, 15, 4] (une application est donnée en annexe .1) d'où on détermine les bus de tension par les expressions de puissances active P_i et réactive Q_i liées sous la puissance apparente S_i [1] :

$$P_i = \text{Re} \left\{ \underline{V}_i^1 \left(\sum_{j=1}^n \underline{Y}_{ij}^1 \cdot \underline{V}_j^1 \right)^* \right\}; \quad U_i = V_i^1 (i = 2, \dots, g) \quad (1.1)$$

$$\underline{S}_i = \left(\sum_{j=1}^n \underline{Y}_{ij}^1 \cdot \underline{V}_j^1 \right)^* \quad (i = g + 1, \dots, c) \quad (1.2)$$

\underline{Y}_{ij}^1 : $ij^{\text{ème}}$ élément de la matrice admittance.

La deuxième formulation du problème est beaucoup plus représentative que la formulation conventionnelle. Elle est connue surtout avec l'arrivée sur le marché des appareils consommateurs de courant non sinusoïdaux encore appelés charges non linéaires. Cette formulation tient compte des courants et tensions harmoniques qui influencent le réseau, et elle permet de calculer :

- Les tensions fondamentales aux jeux de barres ;
- Les tensions harmoniques aux jeux de barres ;
- Les paramètres caractéristiques des charges non linéaires.

On distingue deux grands domaines d'interprétation du problème de la formulation : le domaine temporel [16] et le domaine fréquentiel [17, 18, 7].

a) Le Domaine Temporel

Les méthodes dans ce domaine font appel à la résolution des équations différentielles qui représentent le comportement du système considéré. L'inconvénient avec le domaine temporel est la longueur des calculs à effectuer ; on peut compter des temps d'opération assez considérables.

b) Le Domaine Fréquentiel

Les méthodes dans le domaine fréquentiel sont une modification de la méthode conventionnelle pour tenir compte des effets des charges non linéaires du réseau. Celles-ci sont les plus utilisées dans la littérature pour la résolution du problème des harmoniques. Dans ces méthodes on peut citer les quatre formulations ci-dessous.

La Pénétration Harmonique : *Harmonic Penetration* (HP), [1]

Parmi les formulations évoluées, la HP est la plus simple ; elle se déroule en deux étapes qui permettent la détermination de l'état fondamental stable du réseau en ne considérant au départ aucune interaction entre le réseau et la charge non linéaire, de sorte que la tension du réseau ne présente aucune influence sur la charge non linéaire. Ensuite la détermination du comportement de la charge non linéaire *Nonlinear Device* (NLD) est effectuée ; et alors on peut calculer les tensions harmoniques par la méthode des tensions aux nœuds *Voltage Nodes method* (VN) [19, 20]. La figure 1.1 montre le diagramme de déroulement de la méthode en deux étapes ; la première est une modification de la pénétration harmonique (harmonic penetration) en l'occurrence avec la prise en compte des charges non linéaires (Figure 1.1 bloc CLFm) et la deuxième indique l'application de la méthode des tensions aux nœuds (Figure 1.1 bloc VN).

La résolution des équations de la formulation conventionnelle modifiée CLFm est la même que celle avec la formulation conventionnelle CLF avec un apport pour la détermination du comportement des charges non linéaires NLD. le courant consommé et la matrice

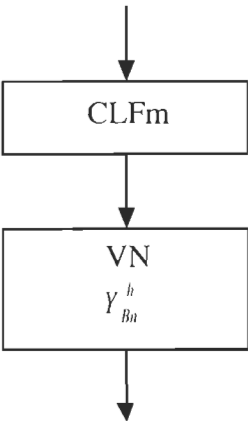


FIGURE 1.1 – Diagramme HP, [1]

TABLE 1.2 – Données et Variables de Calcul en HP, [1]

Infiltration des Harmoniques (HP)			
	Éléments	Données	Inconnues
CLF _m	S	\underline{V}_i^1	...
	PV	P_i, U_i	\underline{V}_i^1
	PQ	P_i, Q_i	\underline{V}_i^1
	NLD	$B_i^1...B_i^r$	$\underline{V}_i^1, \beta_i^1, ..., \beta_i^r$
VN	S	X_i	\underline{V}_1^h
	PV	X_i	\underline{V}_i^h
	PQ	\underline{Y}_i^h	\underline{V}_i^h
	NLD	\underline{I}_i^h	\underline{V}_i^h

des admittances. Le tableau 1.2 montre les variables pour la formulation conventionnelle modifiée, mais surtout on y remarque les variables tensions et courants harmoniques par la méthode des tensions aux nœuds. Dans la résolution, en plus des équations (1.1) et (1.2), on ajoute les équations (1.3), (1.4), et (1.5). Et dès lors que l'on fait rentrer en compte l'interaction harmonique entre le réseau et les charges non linéaires (NLD), on remplace les équations (1.3) et (1.4) par les équations (1.6) et (1.7) pour faire apparaître l'implication des tensions harmoniques.

$$B_i^j = nl^j (\underline{V}_i^1, \beta_i^1, \dots, \beta_i^r), (i = c + 1, \dots, n; j = 1, \dots, r) \quad (1.3)$$

$$\underline{I}_i^k = \underline{d}^k (\underline{V}_i^1, \beta_i^1, \dots, \beta_i^r), (i = g + 1, \dots, n; k = 1, 3, 5, \dots) \quad (1.4)$$

$$\underline{Y}_i^1 = \frac{\underline{S}_i^*}{(\underline{V}_i^1)^2}; \underline{Y}_i^h = \underline{f}_i(\underline{Y}_i^1, h) \quad (i = g + 1, \dots, c; h = 3, 5, \dots) \quad (1.5)$$

$$B_i^j = nl^j (\underline{V}_i^1, \underline{V}_i^h, \beta_i^1, \dots, \beta_i^r), (i = c + 1, \dots, n; j = 1, \dots, r; h = 3, 5, \dots) \quad (1.6)$$

$$\underline{I}_i^k = \underline{d}^k (\underline{V}_i^1, \underline{V}_i^h, \beta_i^1, \dots, \beta_i^r), (i = c + 1, \dots, n; h = 3, 5, \dots) \quad (1.7)$$

\underline{f}_i : fonction dépendant de l'admittance harmonique

B_i^j avec $j = 1, r$: données génériques de la charge non linéaire

β_i^j avec $j = 1, r$: paramètres génériques de la charge non linéaire

X_1 et X_i avec $i = 2, g$: réactances à la fréquence fondamentale

Pénétration par Iteration Harmonique : *Iterative Harmonic Penetration* (IHP), [1, 21]

La méthode de pénétration par itérative harmonique (IHP) est la première modification de la harmonic penetration (HP) à prendre en compte l'influence des harmoniques sur le comportement des charges non linéaires (NLD). La structure des deux algorithmes est la même, hors mis l'ajout du bloc iterative harmonic analysis en complément des tensions aux nœuds (VN) (Figure 1.2). Le but de l'infiltration itérative (IHA) est de calculer les différentes tensions harmoniques des charges non linéaires (NLD) comme des tensions aux

nœuds, et de corriger les solutions de la formulation conventionnelle modifiée (CLFm) (détermination des paramètres des charges non linéaires (NLD) considérant l'influence des harmoniques).

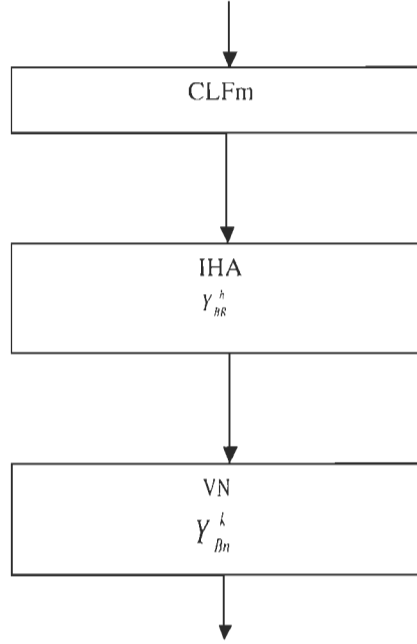


FIGURE 1.2 – Bloc Diagramme IHP, [1]

La résolution numérique prend en compte tour à tour chaque charge non linéaire ($NLD_i = c + 1, n$), et avec l'application de l'algorithme de Gauss-Seidel (GS) (une application numérique de cet algorithme est donnée en annexe .1), on résout l'équation déterminant le courant pour les fréquences harmoniques (1.8) ; puis on effectue la mise à jour des états des charges non linéaires (NLD) $(\beta_i^j)^\delta$ et des courants injectés (1.9), au moyen de la dernière valeur itérative des tensions harmoniques $(V_i^h)^\delta$. Finalement, les tensions harmoniques du système alternatif sont déduites à des itérations (1.10). Dans le tableau 1.3 on peut remarquer l'apparition de la section des données et variables pour les analyses itératives des harmoniques (iterative harmonic analysis).

$$I_B^h = Y_{BR}^h \cdot U_B^h \quad (1.8)$$

$$(\underline{I}_i^k)^\delta = \underline{d}^k \left(\underline{V}_i^1, (\underline{V}_i^h)^\delta, (\underline{\beta}_i^j)^\delta \right) \equiv \underline{d}^k \left((\underline{V}_i^h)^\delta \right) \quad (1.9)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_{c+1}^h \\ \dots \\ \underline{V}_n^h \end{bmatrix}^{\delta+1} = (Y_{BR}^h)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_{c+1}^h \\ \dots \\ \underline{I}_n^h \end{bmatrix}^\delta = (Y_{BR}^h)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \underline{d}^h (\underline{V}_{c+1}^h) \\ \dots \\ \underline{d}^h (\underline{V}_n^h) \end{bmatrix}^\delta \quad (1.10)$$

TABLE 1.3 – Données et Variables de Calcul en IHP, [1]

Infiltration des Harmoniques (HP)			
	Éléments	Données	Inconnues
CLF _m	S	\underline{V}_i^1	...
	PV	P _i , U _i	\underline{V}_i^1
	PQ	P _i , Q _i	\underline{V}_i^1
	NLD	B _i ¹ ...B _i ^r	$\underline{V}_i^1, \beta_i^1, \dots, \beta_i^r$
IHA	S	X ₁	...
	PV	X _i	...
	PQ	\underline{Y}_i^h	...
	NLD	B _i ¹ ...B _i ^r , \underline{V}_i^1	B _i ¹ ...B _i ^r , $\underline{\beta}_i^r$
VN	S	X _i	\underline{V}_1^h
	PV	X _i	\underline{V}_i^h
	PQ	\underline{Y}_i^h	\underline{V}_i^h
	NLD	\underline{I}_i^h	...

Écoulement de Puissance Harmonique Simplifiée : *Simplified Harmonic Load Flow* (SHLF), [1]

La formulation simplifiée permet de corriger non seulement les tensions harmoniques et

les paramètres des charges non linéaires, mais aussi les tensions fondamentales. Par la suite, la convergence des solutions est observée par comparaison des tensions fondamentales trouvées.

Dans la résolution par la méthode de Newton-Raphson (NR), deux procédures d'itérations sont prévues ; une pour la méthode conventionnelle (CLF) et l'autre pour l'analyse harmonique (HA) (bloc diagramme Figure 1.3 et Tableau 1.4).

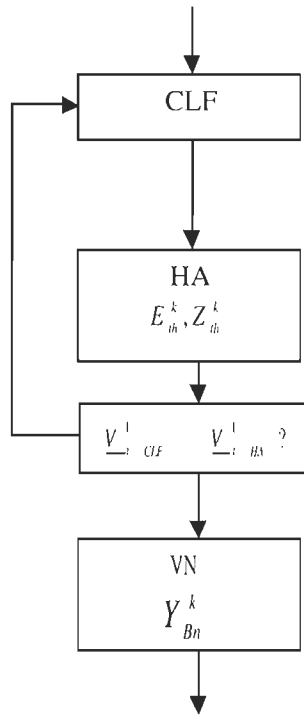


FIGURE 1.3 – Bloc Diagramme SHLF, [1]

L'algorithme de GS ainsi considéré se déroule en deux étapes successives ; la première est une application de la formulation conventionnelle typique (CLF) dans laquelle les charges non linéaires (NLD) sont considérées comme charges actives et réactives (PQ loads). Dans la seconde étape, l'analyse harmonique (HA), le réseau alternatif est réduit aux jeux de barres des charges non linéaires (NLD) à partir des solutions de la méthode conventionnelle (CLF), et le réseau alternatif lui-même est représenté par un générateur équivalent de

Thévenin.

$$E_{th}^k = \begin{bmatrix} \underline{E}_{th1}^k \\ \dots \\ \underline{E}_{thn-c}^k \end{bmatrix} ; Z_{th}^k = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{th1,1}^k \dots \underline{Z}_{th1,n-c}^k \\ \dots \\ \underline{Z}_{thn-c,1}^k \dots \underline{Z}_{thn-c,n-c}^k \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

$$\underline{V}_i^k = \underline{E}_{thi}^k - \sum_{j=i}^{n-c} \underline{Z}_{thi,j}^k \cdot \underline{I}_i^k \quad (i = 1, \dots, n - c; k = 1, 3, 5, \dots) \quad (1.12)$$

TABLE 1.4 – Données et Variables de Calcul en SHLF, [4]

Formulation Simplifiée (SHLF)			
	Éléments	Données	Inconnues
CLF _m	S	\underline{V}_i^1	...
	PV	P _i , U _i	\underline{V}_i^1
	PQ	P _i , Q _i	\underline{V}_i^1
	NLD	\underline{I}_i^1	\underline{V}_i^1
HA	S	X ₁ , \underline{V}_i^1	...
	PV	X ₁ , \underline{V}_i^1	...
	PQ	\underline{Y}_i^h	...
	NLD	B _i ¹ ...B _i ^r	\underline{V}_i^k , B _i ¹ ...B _i ^r
VN	S	X ₁	\underline{V}_1^h
	PV	X _i	\underline{V}_i^h
	PQ	\underline{Y}_i^h	\underline{V}_i^h
	NLD	\underline{I}_i^h	...

Écoulement de Puissance Harmonique Complète : *Complete Harmonic Load Flow* (CHLF), [1]

La formulation complète est aussi une modification de la formulation conventionnelle, pour prendre en compte les charges non linéaires (NLD) et les harmoniques du réseau. Cette formulation propose un seul système d'équations non linéaires dont la résolution numérique

prend en compte les tensions harmoniques dans les jeux de barres au fur et à mesure de leur inclusion dans le système. Les deux écritures suivantes sont utilisées.

• **Formulation Complète avec Puissance à la Fréquence Fondamentale (CHLF_F)**

La formulation complète qui ne tient compte que de la puissance à la fréquence fondamentale avec les équations non linéaires suivantes (cf. Tableau 1.5 pour la symbologie).

TABLE 1.5 – Données et Variables de Calcul en CHLF_F, [1]

Première Formulation Simplifiée (SHLF _F)		
Éléments	Données	Inconnues
S	\underline{V}_1^1	\underline{V}_1^h
PV	P_i, U_i	\underline{V}_1^k
PQ	P_i, Q_i	\underline{V}_1^k
NLD	$B_i^1 \dots B_i^r$	$\underline{V}_i^k, \beta_i^1, \dots, \beta_i^r$

Le jeu de barre de puissance active constante et de tension constante (PV)

$$P_i = R_c \left\{ \underline{V}_i^1 \left(\sum_{j=1}^n \underline{Y}_{ij}^1 \cdot \underline{V}_j^1 \right)^* \right\} \quad (1.13)$$

$$U_i = \sqrt{\sum_{k=1,3,\dots} (\underline{V}_i^k)^2} \quad (1.14)$$

($i = 2, \dots, g$)

Le jeu de barres de puissances constantes active et réactive (PQ)

$$\underline{S}_i = \underline{V}_i^1 \left(\sum_{j=1}^n \underline{Y}_{ij}^1 \cdot \underline{V}_j^1 \right)^* \quad (i = g + 1, \dots, c) \quad (1.15)$$

Condition d'équilibre des courants harmoniques dans les jeux de barres

$$\underline{Y}_i^k \cdot \underline{V}_i^k + \sum_{j=1}^n \underline{Y}_{ij}^k \cdot \underline{V}_j^k = 0 \quad (i = 1, \dots, c; k = 1, 3, 5, \dots) \quad (1.16)$$

Condition d'équilibre des courants harmoniques aux charges non linéaires (NLD)

$$\sum_{j=1}^n \underline{Y}_{ij}^k \cdot \underline{V}_j^k = \underline{I}_i^k \quad (i = c + 1, \dots, n; k = 1, 3, 5, \dots) \quad (1.17)$$

- **Formulation Complète avec Puissance à la Fréquence Fondamentale et aux Harmoniques (CHLF_H)**

Cette formulation tient compte de la puissance à la fréquence fondamentale et aux harmoniques (cf. Tableau 1.6 pour la symbologie).

TABLE 1.6 – Données et Variables de Calcul en CHLF_H, [1]

Deuxième Formulation Simplifiée (SHLF _H)		
Éléments	Données	Inconnues
S	\underline{V}_1^1	\underline{V}_1^h
PV	P_i, U_i	\underline{V}_1^k
PQ	P_i, Q_i	$\underline{V}_i^k, \underline{Y}_i^k$
NLD	$B_i^1 \dots B_i^r$	$\underline{V}_i^k, \beta_i^1, \dots, \beta_i^r$

Les équations non linéaires utilisées pour la résolution numérique sont les suivantes :

- Le jeu de barre de puissance active constante et de tension constante (PV)

$$P_i = R_e \left\{ \sum_{k=1,3,\dots} \underline{V}_i^k \left(\sum_{j=1}^n \underline{Y}_{ij}^k \cdot \underline{V}_j^k \right)^* \right\} \quad (1.18)$$

$$U_i = \sqrt{\sum_{k=1,3,\dots} (V_i^k)^2} \quad (i = 2, \dots, g) \quad (1.19)$$

- Le jeu de barres de puissances constantes active et réactive(PQ)

$$\underline{S}_i = \sum_{k=1,3,\dots} \underline{V}_i^k \left(\sum_{j=1}^n \underline{Y}_{ij}^k \cdot \underline{V}_j^k \right)^* \quad (i = g + 1, \dots, c) \quad (1.20)$$

- Les différents courants harmoniques selon les équations (1-16) et (1-17)
- L'expression du comportement des charges non linéaires selon (1-6)

- La relation entre les charges actives, réactives et leurs admittances

$$\underline{S}_i = \sum_{k=1,3,\dots} (V_i^k)^2 (\underline{Y}_i^k)^*, \quad (i = g + 1, \dots, c) \quad (1.21)$$

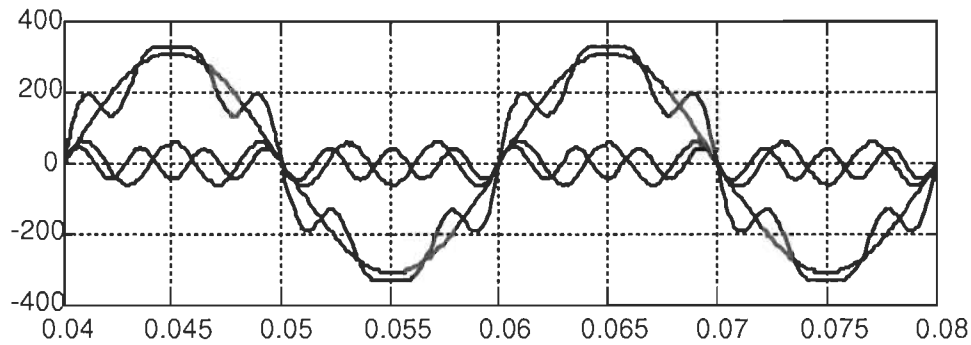
1.2.3 Méthodes d'Élimination des Harmoniques

Dans la littérature, les travaux sur les harmoniques connaissent un grand essor avec l'avènement de la technologie des semi-conducteurs ; notamment dans le cadre du filtrage actif avec le principe de compensation des harmoniques proposé par H. SASAKI et T. MACHIDA en 1971 [22]. Par la suite, depuis les années quatre-vingt-dix, la compensation des harmoniques par filtrage actif est rentrée dans l'ordre des sujets de recherche et de développement étudiés par les scientifiques.

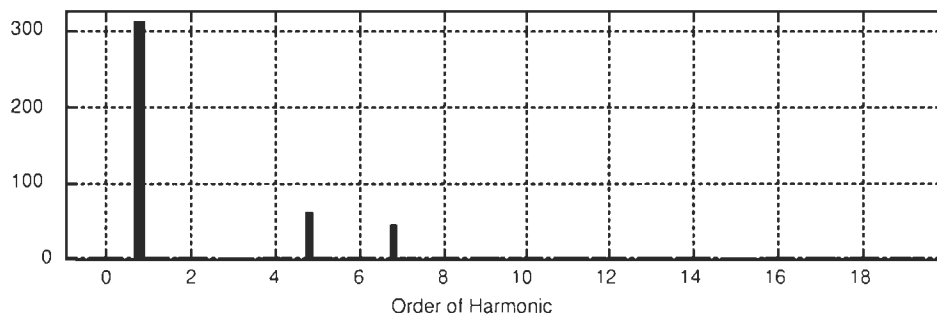
On rencontre différentes topologies de filtres actifs [23, 24] adaptées au besoin du réseau considéré. En général les schémas sont constitués de deux grands blocs, dont la configuration permet de faire la différence entre ceux-ci, à savoir la partie puissance et la partie commande. Dans les applications, on rencontrera le filtre actif série [23, 24] celui-ci est approprié pour la compensation des harmoniques ; tout aussi pour les tensions perturbatrices et creux de tension [23, 24]. Le filtre actif parallèle [25] quant à lui est branché en parallèle sur le réseau et son rôle consiste à empêcher la circulation des harmoniques dans le réseau selon un programme qui a pour rôle d'injecter des courants identiques à ceux consommés par la charge polluante identifiée, mais en opposition de phase par rapport à ces derniers. Cependant, il peut aussi être utilisé comme un compensateur de la puissance réactive dans le réseau (STATCOM) [26]. Dans un souci de plus d'efficacité, on rencontre aussi des combinaisons de ces deux configurations ; la combinaison parallèle-série actif encore appelée en anglais unified power quality conditioner (UPQC) [23, 24] ; de même que la combinaison hybride faite de filtres actifs et filtres passifs. Dans la littérature, ces topologies sont soutenues et diversifiées par leurs algorithmes de commande qui s'étendent principalement sur le domaine fréquentiel avec les transformées de Fourier [6], et sur le domaine temporel où

l'on trouve la méthode des puissances instantanées. On note aussi l'utilisation des réseaux de neurones artificiels [27] ou encore la logique floue [28]. Les filtres actifs sont aussi différenciés selon leur type de source (courant ou tension), de même que selon leur système de génération des signaux de contrôle des semi-conducteurs du convertisseur en place.

1.2.4 Caractéristiques de l'Onde



(a) Onde Déformée Contenant une Fondamentale et des Harmoniques



(b) Spectre Harmonique de l'Onde Déformée

FIGURE 1.4 – Onde Déformée

Les centrales électriques (sources de tension), en général, produisent une onde parfaitement sinusoïdale et de fréquence fixe (50Hz ou 60Hz). Une fois rendue aux points de

connexion dans le réseau, cette onde est influencée par le courant absorbé par les matériels utilisant de l'électronique de puissance tels que les variateurs de vitesse, les gradateurs et certains appareils électroménagers tels que ordinateurs et téléviseurs [10]. Ainsi, il apparaît des courants harmoniques de fréquences multiples à la fréquence fondamentale [9]. Grâce à la théorie de Fourier, il est possible de décomposer l'onde d'un tel courant pollué et d'observer son spectre (Cf. Figure 1.4(a) et (b)).

$$f_h = (h) \times (\text{fréquence fondamentale}) \quad (1.22)$$

$h =$ entier naturel

Par exemple, dans un système CA de fréquence 60Hz, un courant harmonique de rang 5 aura une composante fréquentielle de valeur :

$$f_h = (5) \times (60) = 300Hz \quad (1.23)$$

A. L'Onde et le Réseau

Différents analyseurs d'harmoniques permettent de déterminer les composantes d'une onde ainsi que sa qualité. En général, les oscilloscopes analogiques, numériques ou mixtes sont utilisés pour couvrir tous les types d'application. Avec l'analogique, on obtient l'affichage du signal considéré en temps réel sans perte ni ambiguïté. Avec le numérique, on parvient à analyser les causes d'un phénomène en visualisant les événements uniques ou antérieurs au déclenchement.

Les harmoniques sont généralement regroupés en deux classes : les harmoniques de rang pair (2, 4, 6, ...) et les harmoniques de rang impair (1, 3, 5, ...). Le rang harmonique étant défini comme le rapport entre la fréquence de cet harmonique et la fréquence fondamentale du réseau.

Pour un signal périodique non sinusoïdal, on peut écrire :

$$Y = A_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} A_n \cdot \cos(n\omega t - \varphi_n) \quad (1.24)$$

avec :

A_0 : Composante continue

n : rang de l'harmonique, $n \in [1, +\infty[$

(la fondamentale ayant pour rang $n = 1$)

A_n : Amplitude de l'harmonique de rang n

φ_n : Déphasage entre la fréquence fondamentale et l'harmonique de rang n

B. L'Onde et la Charge

Avec l'utilisation de l'électronique de puissance dans les convertisseurs statiques, il est possible de transformer la forme d'onde du courant consommé et de modifier la puissance électrique utilisée par les récepteurs [28]. Ainsi, on classe généralement les récepteurs en deux grandes familles dépendamment du courant consommé :

1) Les Charges Linéaires

On dit d'une charge qu'elle est linéaire lorsque celle-ci, alimentée par une tension sinusoïdale, consomme un courant sinusoïdal. Il reste par contre possible que le courant et la tension soient déphasés. Les charges linéaires le plus souvent utilisées sont faites de condensateurs, de résistances et d'inductances.

2) Les Charges Non Linéaires

Une charge est dite non linéaire lorsque celle-ci, alimentée par une tension sinusoïdale, consomme un courant non sinusoïdal ; de sorte que la relation entre le courant et la tension n'est plus linéaire (cf. Figure 1.5).

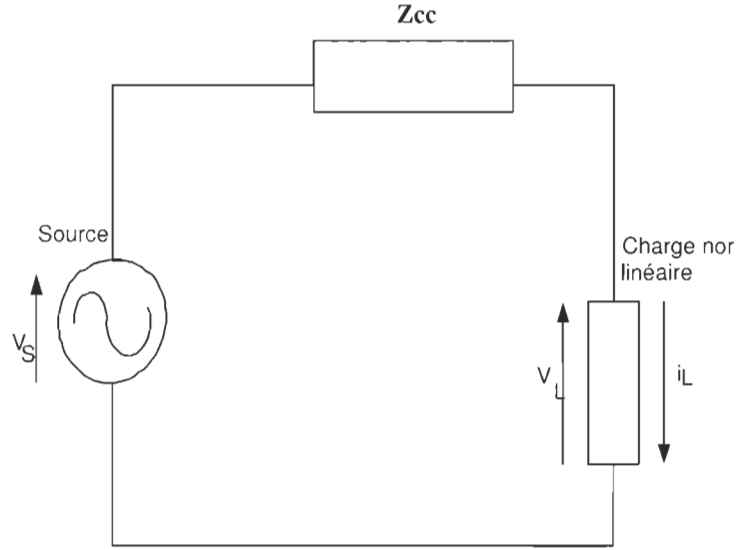


FIGURE 1.5 – Modélisation du Réseau et de la Charge

$$\nu_s = V_s \sqrt{2} \sin(\omega t) \quad (1.25)$$

$$i_L(t) = i_{L_f}(t) + i_{L_h}(t) \quad (1.26)$$

$$i_{L_f}(t) = I_{L_f} \sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi_1) \quad (1.27)$$

$$i_{L_h}(t) = \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2} \sin[h(\omega t - \varphi_h)] \quad (1.28)$$

$$\omega = 2\pi f_0 \quad (1.29)$$

avec :

f_0 : Fréquence du fondamental

V_s : Valeur efficace de la tension

I_{L_f} : Valeur efficace du fondamental du courant de charge

I_{L_h} : Valeur efficace de l'harmonique de rang h du courant de charge

φ_1 : Déphasage entre le fondamental du courant de charge et la tension

φ_h : Déphasage entre l'harmonique de rang h du courant de charge et la tension.

A partir des équations précédentes, on peut écrire

$$i_L(t) = I_{L_f} \sqrt{2} \sin \omega t - \varphi_1 + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2} \sin[h(\omega t - \varphi_h)] \quad (1.30)$$

Si on considère un réseau triphasé et équilibré, la distribution du courant à la charge pourra être répartie de la manière suivante :

- Les fondamentaux seront de séquence directe. c'est-à-dire identique à celle de la tension.
- Les harmoniques de rang 3 seront en phase (système homopolaire).
- Les harmoniques de rang 5 auront une séquence de phase inverse à celle de la tension (système inverse).
- Les harmoniques de rang 7 présenteront une séquence en phase avec celle de la tension (système direct) et ainsi de suite [29].

$$i_{L_a}(t) = I_{L_f} \sqrt{2} \sin(\omega t - \phi_1) + \dots + I_{L_h} \sqrt{2} \cdot \sin(h(\omega t - \varphi_h)) \quad (1.31)$$

$$i_{L_b}(t) = I_{L_f} \sqrt{2} \sin(\omega t - \phi_1 - \frac{2\pi}{3}) + \dots + I_{L_h} \sqrt{2} \cdot \sin(h(\omega t - \varphi_h) - h \frac{2\pi}{3}) \quad (1.32)$$

$$i_{L_c}(t) = I_{L_f} \sqrt{2} \sin(\omega t - \phi_1 + \frac{2\pi}{3}) + \dots + I_{L_h} \sqrt{2} \cdot \sin(h(\omega t - \varphi_h) + h \frac{2\pi}{3}) \quad (1.33)$$

• Taux de Distorsion Harmonique et Facteur de Puissance

a) Taux de Distorsion Harmonique

Il est possible de caractériser les perturbations harmoniques au moyen de deux paramètres, le taux de distorsion harmonique (THD) et le facteur de puissance. Le THD permet de quantifier les perturbations harmoniques, et le facteur de puissance permet de qualifier la consommation de la puissance réactive [18].

Le taux de distorsion harmonique peut être calculé pour le courant par :

$$TDH_i \% = 100 \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{I_{L_h}}{I_{L_f}} \right)^2} \quad (1.34)$$

De même en tension, il est exprimé par l'expression :

$$TDH_{\nu} \% = 100 \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{V_{L_h}}{V_{L_f}} \right)^2} = 100 \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{|Z_{cch}| I_{L_h}}{V_{L_f}} \right)^2} \quad (1.35)$$

b) Facteur de Puissance

Pour ce qui est du facteur de puissance, il est défini par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S , rapport qui tient compte des harmoniques :

$$F = \frac{P}{S} \quad (1.36)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (1.37)$$

$$D = 3 V_{L_f} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{L_h}^2} \quad (1.38)$$

où V_{L_f} et I_{L_f} : tension et courant instantanés, sous fréquence fondamentale

Il est important de ne pas confondre le facteur de puissance avec le cosinus de φ ($\cos\varphi$) qui est le facteur de déplacement de la puissance ; ce facteur $\cos\varphi$, est bon à tenir proche de la valeur 1 (angle φ petit) pour ne pas avoir à fournir une intensité forte due au fait que la puissance apparente devra aussi être forte. La seule possibilité très rare de voir le $\cos\varphi$ et le facteur de puissance en égalité est lorsque la tension et le courant tirés du réseau sont tous deux purement sinusoïdaux. Puisque le $\cos\varphi$ se rapporte uniquement à la fréquence fondamentale. dès lors que les harmoniques sont pris en compte, il est différent du facteur de puissance.

1.2.5 Sources des Harmoniques

Les harmoniques peuvent être générés à travers les deux moyens connus, le courant et la tension [30, 24, 31].

Dans le cas du courant, il est constaté que le taux d'harmoniques en courant est étroitement lié à la charge. La principale source des harmoniques de nos jours vient des nombreux

appareils électriques qui s'alimentent au moyen des convertisseurs statiques. On peut citer des perturbateurs tels que les redresseurs, les appareils à arc électrique et les convertisseurs de courant.

Le taux d'harmoniques en tension varie avec l'impédance de source (Cf. Tableau 1.7). En plus des courants pollués qui en sont une source connue, on peut mentionner les transformateurs, lorsque ceux-ci sont en régime saturé; et aussi les bobinages.

TABLE 1.7 – Influence de l'Impédance de Source

Impédance de Source	Courants Harmoniques	Distorsion en Tension
faible	favorise leur circulation	faible
élevée	réduit leur circulation	élevée

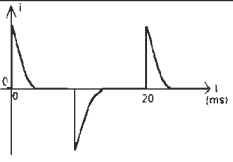
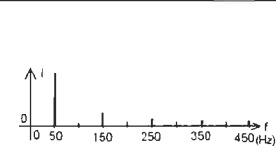
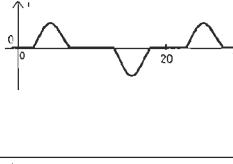
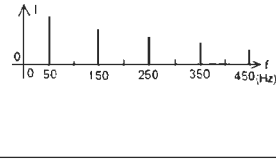
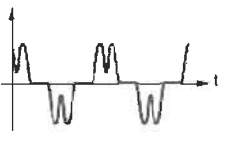
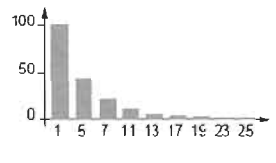
Dans le cadre de la prédiction des harmoniques, l'un des moyens les plus communément rencontrés s'avère être les tableaux grâce auxquels on peut avoir une idée des spectres et des formes d'ondes de courant exigées par différentes sortes de charges que l'on peut trouver dans des appareils et autres éléments électroniques, électrotechniques ou électroménagers (Cf. Tableau 1.8).

1.2.6 Les Effets des Harmoniques

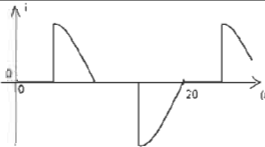
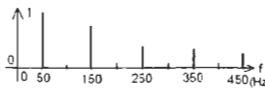

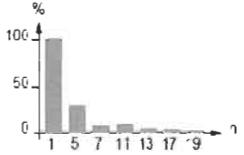
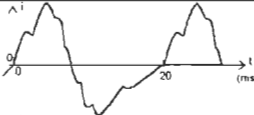
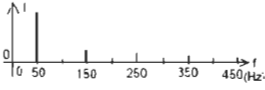
L'électricité est un produit dont les principales caractéristiques sont la continuité et la qualité. Ces caractéristiques peuvent être influencées par plusieurs facteurs et causer ainsi des effets néfastes pour le réseau et pour les consommateurs. Dans le cas des harmoniques, les effets peuvent être directs ou à long terme.

Comme effets directs, ce sera surtout les systèmes électroniques qui seront mis en cause avec notamment une perturbation de la commutation des thyristors lors du passage à zéro de la tension. De façon plus marquée, on peut constater une augmentation du bruit dans les moteurs, de même qu'un déclenchement intempestif des disjoncteurs; il peut aussi

TABLE 1.8 – Charges Polluantes et Spectres de Courants Absorbés, [5]

Type de Charge	Appareils Concernés	Courant Absorbé	Spectre Harmonique Correspondant
Éclairage	Tubes fluorescents Lampes à vapeur HP		
Redresseur monophasé à diodes avec filtrage, alimentation à découpage	Micro-informatique, Téléviseurs, Lampes à ballast électronique		
Redresseur triphasé à thyristors avec filtrage	Variation de vitesse des moteurs asynchrones à vide ou sous faible charge		

A SUIVRE...

Type de Charge	Appareils Concernés	Courant Absorbé	Spectre Harmonique Correspondant
Gradateur monophasé	Régulation de puissance des fours à résistances ; Modulation de puissance des lampes halogènes		
Redresseur triphasé à thyristors	Variation de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones		
Moteur asynchrone	Machine-outils ; Appareils électroménagers ; Ascenseurs		

arriver que la puissance des moteurs baisse. Un cas répandu est celui de l'apparition des interférences sur le réseau de télécommunication : altération des images de la télévision, mauvais son radio ou bruit de téléphone.

À long terme, les appareils subissent une sorte de lessivage qui est traduit par le vieillissement, ce qui contribue à la réduction de la durée de vie de ces derniers (ex : moteurs, transformateurs). Il y a aussi le risque d'échauffement des câbles et matériels électriques.

Les phénomènes de résonance et le courant du neutre constituent d'autres effets alarmants causés par les harmoniques.

Les Phénomènes de Résonance

Ceux-ci apparaissent avec la présence dans le réseau des éléments inductifs et capacitifs tels que les lignes, les transformateurs et condensateurs. Ce phénomène consiste à élever les amplitudes des courants sur certains rangs harmoniques tels que les rangs 5 et 7, causant parfois la destruction des équipements concernés.

Le Courant du Neutre

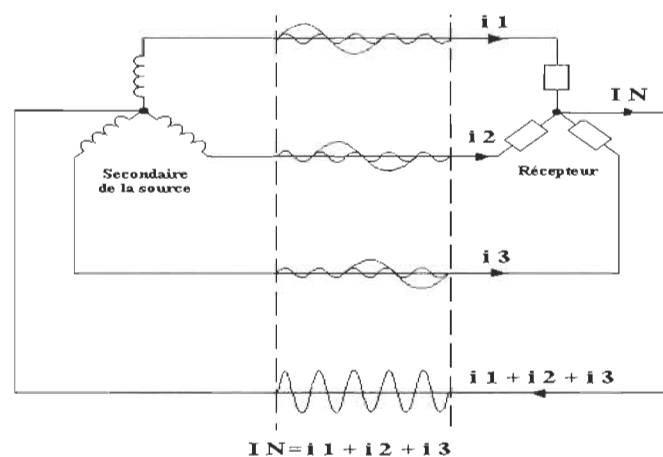


FIGURE 1.6 – Courant du Neutre

Théoriquement, les composantes homopolaires dans le neutre sont nulles. Mais avec les charges non linéaires du réseau équilibré, les courants harmoniques de rang 3 qui sont en phase, vont s'additionner dans le conducteur du neutre, avec une fréquence de 150Hz pour un réseau de 50Hz ; ce qui peut détériorer ce dernier s'il est mal dimensionné, et même engendrer des incendies (cf. Figure 1.6).

1.2.7 La Réglementation sur la Pollution Harmonique

Comme pour tout produit, sur les marchés, soumis à la loi de l'offre et de la demande, l'électricité est sujette à des normes qui régulent son marché. Ces normes sont déterminées par des organisations telles que la Commission électrotechnique Internationale (CEI) et le Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Elles ont pour principal rôle de limiter la pollution des réseaux pour assurer une qualité de produit fiable pour tous les usagés.

Quelques exemples de normes sont :

- Norme IEEE standard 519 [32] détaillé en annexe .2 ;
- Norme Internationale CEI 1000-4-7 deuxième édition 2002-08 ;
- Norme CEI 61000-2-2 et CEI 61000-2-12.

1.3 Objectifs

L'objectif de ce travail est d'évaluer les harmoniques de courant et de tension causées par des charges non linéaires et de proposer des méthodes pour contrer la propagation des harmoniques de courant et réduire les déformations des tensions du réseau.

Ainsi, dans un premier temps, nous ferons une étude approfondie des méthodes existantes utilisées pour contrer la propagation des harmoniques et pour leur compensation.

Dans un deuxième temps, nous procéderons au choix d'une topologie particulière (topologie hybride, filtre actif et filtre passif en combinaison) à analyser et y appliquerons

les méthodes étudiées dans la première partie. Finalement, nous ferons la validation des résultats par simulation avec Matlab/Simulink/SimpowerSystems.

1.4 Structure du Mémoire

Ce travail de mémoire est étalé sur cinq chapitres permettant de faire l'évaluation des harmoniques ainsi que leur compensation. Le premier chapitre porte sur l'introduction générale ; il y est exposé la théorie sur les harmoniques selon les travaux antérieurs. Dans le chapitre 2, il est présenté les différentes méthodes courantes pour contrer la propagation des harmoniques. Le chapitre 3 propose une étude du filtre actif parallèle (FAP). Le chapitre 4 porte sur une mise en œuvre de filtre passif, filtre actif parallèle, et enfin filtre hybride, par des simulations sous Matlab/Simulink. Finalement, le chapitre 5 tire une conclusion générale sur tout le travail réalisé.

1.5 Contribution

La réalisation de ce projet de maîtrise aura permis l'étude du filtrage des harmoniques, et principalement du filtre actif et les différents aspects de sa topologie. Il est aussi important de noter les formulations du problème ; à savoir la façon dont les réseaux d'énergie électrique étaient perçus et utilisés dans les premiers aspects de distribution d'énergie, jusqu'au moment où il a été nécessaire de prendre en compte la présence des harmoniques. Les équations les mieux représentatives du problème sont tour à tour présentées en mesure de l'évolution des difficultés. Des simulations ont été effectuées pour permettre de voir l'efficacité du filtrage actif et ainsi approuver toute la théorie citée sur le filtre actif parallèle, le filtre passif et le filtre hybride.

1.6 Conclusion

Ce chapitre nous aura permis de voir comment dans la littérature les auteurs ont interprété le problème des harmoniques au moyen des expressions mathématiques, nous avons aussi pu comprendre l'origine et les effets des courants harmoniques dans les réseaux de distribution. Ce premier chapitre nous aura surtout conduit à mieux saisir l'importance du maintien de la qualité de l'onde, nécessaire pas seulement pour le distributeur, mais aussi pour le consommateur. Le chapitre suivant vient à point nommé pour expliquer les méthodes de compensation des harmoniques.

Chapitre 2

Méthodes pour Contrer les Harmoniques

2.1 Introduction

La lutte contre la prolifération des harmoniques a son importance intimement liée à la croissance des poussées technologiques, avec de plus en plus d'inventions d'appareils facilitant la vie courante, mais très incommodantes quant à la forme de courant que ces appareils consomment. Dans le souci de lier la forme du courant au respect des normes en vigueur, des travaux se consacrent à l'amélioration de la qualité de l'onde en proposant des structures qui visent à minimiser les courants harmoniques du réseau de distribution [32], pour ainsi éviter leurs effets nocifs au réseau, soit en confinant ces courants au point où ils sont utiles dans un réseau. ou en les piégeant par des filtres accordés à leurs fréquences, ou encore en provoquant dans le réseau des ondes de même type que leurs harmoniques, mais en opposition de phase par rapport à ces derniers [11].

Au départ, il serait simple et très commode d'utiliser la méthode la plus économique qui soit ; à savoir ne connecter dans le réseau que des charges non polluantes. sinon très moins polluantes en vue du respect des normes en cours sur les taux de courants harmoniques

[30]. Mais ceci serait beaucoup trop contraignant et à la limite impossible compte tenu des besoins en courants de formes d'ondes diverses pour alimenter par exemple les ordinateurs (alimentation à découpage), les variateurs de vitesse des moteurs à courant continu et alternatif, les variateurs de lumières, les régulateurs de systèmes de chauffage électrique, les variateurs de vitesse de moteurs universels (lave linge, aspirateurs, etc.)

Par conséquent on ne saurait se passer des charges non linéaires. Les techniques dont nous allons énumérer dans les paragraphes qui suivent sont quelques unes parmi celles utilisées pour limiter la prolifération des harmoniques. La figure 2.1 montre un exemple de l'effet de l'harmonique de rang 3 sur une onde sinusoïdale.

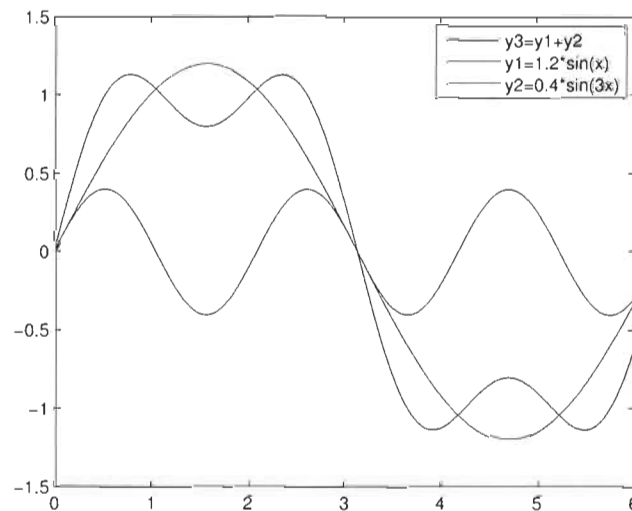


FIGURE 2.1 – Forme d'Onde Contenant une Harmonique de Rang 3 (Courant de Magnétisation des transformateurs)

2.2 Solutions Traditionnelles

2.2.1 Protection du Conducteur de Neutre

Pour empêcher la destruction du conducteur de neutre sous l'influence des composantes homopolaires qui s'y additionneraient, il suffirait tout simplement de renforcer la structure de celle-ci. Ainsi rendu robuste, le conducteur du neutre est sensé supporter l'augmentation de courant.

2.2.2 Inductance de Lissage

Dans le but de limiter la prolifération des effets nocifs dans le réseau, il est possible de limiter les courant harmoniques de certains convertisseurs en intercalant entre leur point de raccordement et leur entrée une inductance dite de lissage ; dispositif utilisé dans le cas des redresseurs avec condensateurs en tête (Figure 2.2). La distorsion en tension aux bornes de la charge augmente parallèlement avec l'augmentation de l'inductance de ligne.

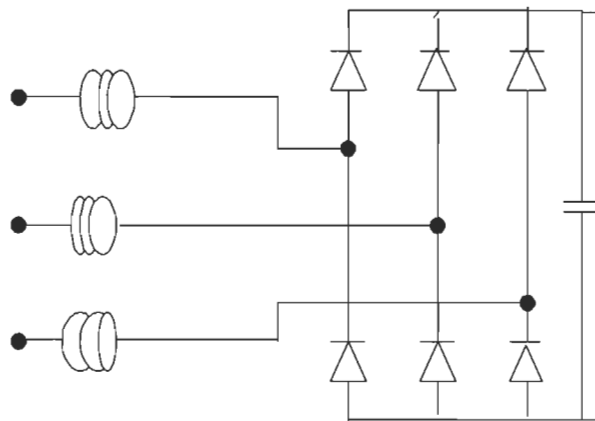


FIGURE 2.2 – Une Installation d'Inductance de Lissage

2.2.3 Action sur l'Impédance Harmonique de la Source

Il s'agit ici d'une solution pratique qui consiste à diminuer l'impédance harmonique de la source, en branchant la charge non linéaire directement sur un transformateur assez puissant ; ou alors en choisissant un générateur à faible impédance harmonique (Figure 2.3).

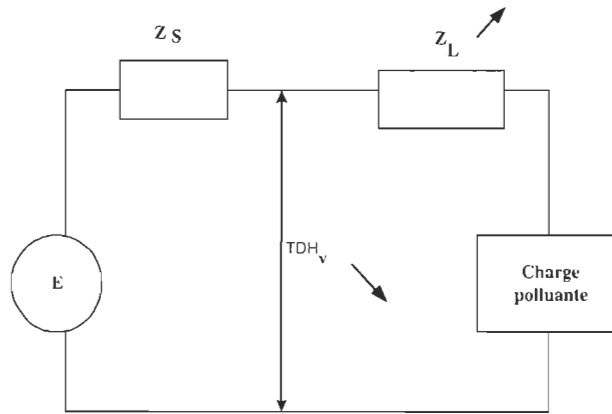


FIGURE 2.3 – Ajout d'une Inductance en Aval ou Diminution de l'Impédance de Source en Amont

2.2.4 Action sur la Structure de l'Installation

Pour prévenir tout dommage, il serait mieux de bien s'y prendre lorsqu'on effectue la connexion des éléments dans un réseau de distribution ; nous pouvons en exemple envisager deux cas illustrés par les figures 2.4 et 2.5.

- **Connexion à Éviter**

Il est recommandé d'éviter de connecter en parallèle un récepteur sensible avec une charge non linéaire (cf. Figure 2.4).

- **Connexion Requise**

Dans le même sens, il est assez judicieux de veiller à ce qu'une charge non linéaire de fort niveau de pollution soit alimentée avec un autre transformateur source (cf. Figure

2.5). Ici, la distance entre les deux charges est beaucoup plus importante que dans le cas de la figure 2.4.

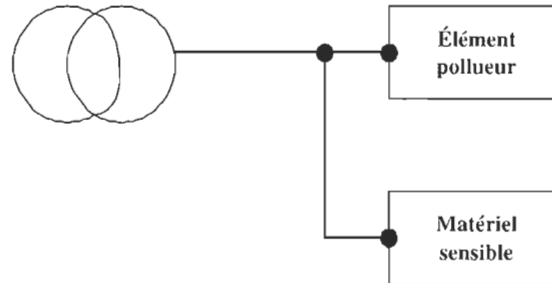


FIGURE 2.4 – Connexion à Éviter

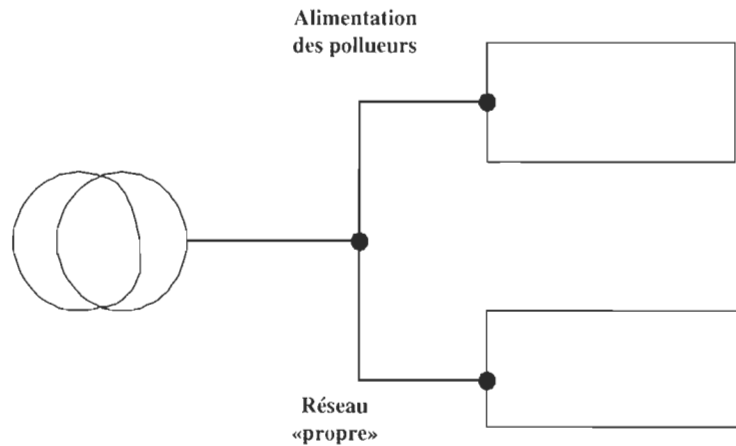


FIGURE 2.5 – Connexion Requise

2.2.5 Utilisation de Transformateurs à Couplages Spécifiques

Dans le but de confiner les harmoniques à une partie aussi réduite que possible du réseau, il est possible d'utiliser des transformateurs ayant un couplage spécial permettant d'annuler certains rangs d'harmoniques [31]. La figure 2.6 donne un exemple de connexion des enroulements.

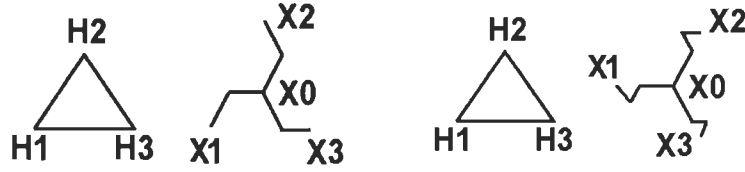
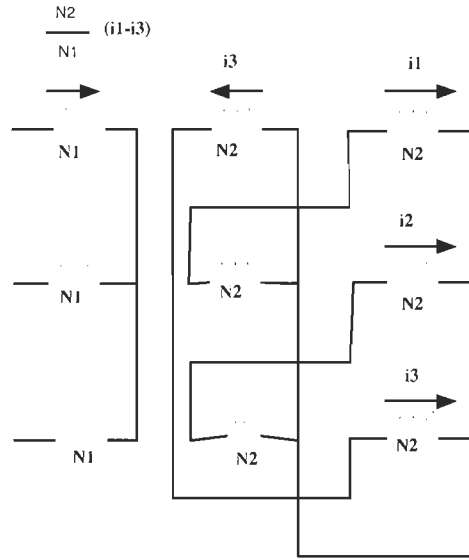


FIGURE 2.6 – Mode de Connexion des Enroulements ZIG-ZAG

Exemple [1] : Calcul montrant pourquoi les courants de pulsation $3k\omega$ ne se retrouvent pas au primaire du transformateur (courant homopolaire) (cf. Figure 2.7).

FIGURE 2.7 – Transformateur à Secondaire ZIG-ZAG et Atténuation des Harmoniques de Rang $3k$, [2]

Considérons un transformateur de courant avec deux enroulements. Pour un rapport de transformation $\frac{N_2}{N_1}$, le courant circulant par exemple dans l'enroulement primaire 1 est déterminé comme suit :

$$\text{Expression du rapport de transformation lié au courant : } \frac{N_2}{N_1}(i_1 - i_3) \quad (2.1)$$

avec

$$i_1 = I_{1(3k)} = I \sin(3k\omega t) \quad (2.2)$$

$$i_3 = I_{3(3k)} = I \sin 3k(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \quad (2.3)$$

$$i_3 = I \sin(3k\omega t - 4\pi) \quad (2.4)$$

d'où

$$\frac{N_2}{N_1}(i_1 - i_3) = 0 \quad (2.5)$$

$k \in N$,

ω : pulsation (rd)

2.3 Filtrage Passif

Le filtre passif est utilisé dans plusieurs domaines de l'électronique, dans le traitement du signal, notamment avec son aptitude à atténuer certaines composantes de celui-ci, pour en laisser passer d'autres. Un filtre est dit passif lorsque sa mise en fonction ne nécessite aucune source d'énergie. Le filtre passif est composé essentiellement d'éléments capacitifs et inductifs, ainsi que des résistances. Sa conception est fonction des harmoniques à atténuer ou à éliminer. En général dans l'usage, on rencontre deux types de filtres passifs ; le filtre passif amorti et le filtre passif résonant [12, 31, 32].

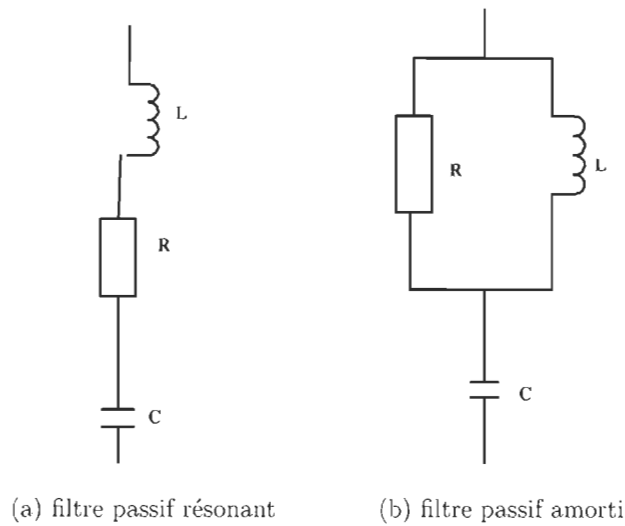


FIGURE 2.8 – Types de Filtres Passifs

a) Filtre Passif Résonant

Le filtre passif résonant (cf. Figure 2.8(a)) a pour avantage d'être un filtre très sélectif, il peut se placer en parallèle et en amont de la charge non linéaire ; de sorte à créer un chemin facile pour le courant harmonique dont la fréquence correspond à celle sous laquelle le filtre a été accordé. Il peut en plus se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonants. La fréquence d'accord peut être définie par :

$$f_r = 1 / 2\pi \sqrt{LC} \quad (2.6)$$

Et le facteur de qualité est déterminé selon :

$$f_q = 2\pi \cdot f_r \cdot L/R \quad (2.7)$$

Sur le plan de son activité, le filtre passif résonant est surtout utile pour filtrer les harmoniques d'ordre 5, 7, ou 11 ; et à cet effet son impédance $Z(f)$ en fonction de la fréquence cible présente une courbe d'évolution en parabole comme suit (Cf. Figure 2.9) :

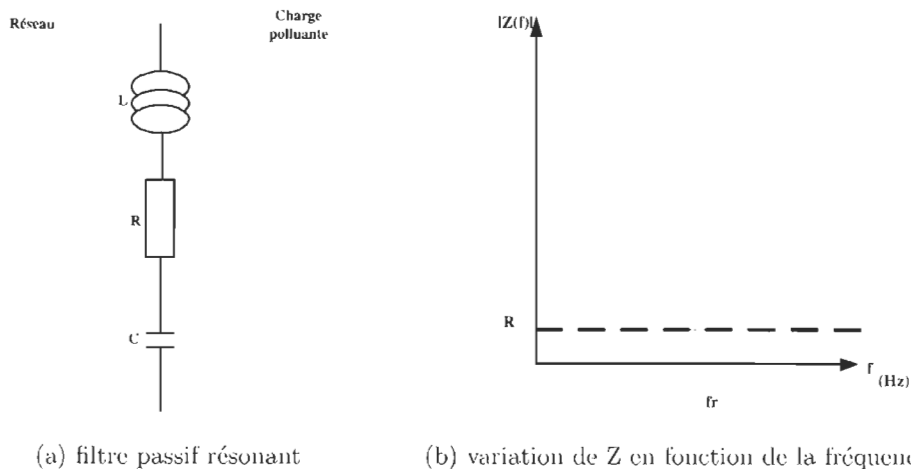


FIGURE 2.9 – Filtre Passif Résonant et Variation de Z en Fonction de la Fréquence

b) Filtre Passif Amorti

Le filtre passif amorti (cf. Figure 2.8(b)) a presque la même structure que le filtre passif

résonant. à la seule différence que dans son cas la résistance et l'inductance sont en parallèle puis les deux en série avec la capacité.

Contrairement au filtre passif résonant, le filtre passif amorti est capable de filtrer plusieurs fréquences à la fois ; à savoir celle pour laquelle il est accordé, et en plus les fréquences au dessus de celle-ci dans le diagramme spectral d'où son qualificatif de « filtre amorti passe-haut ». La figure 2.10 indique la variation de l'impédance $Z(f)$ en fonction de la fréquence cible.

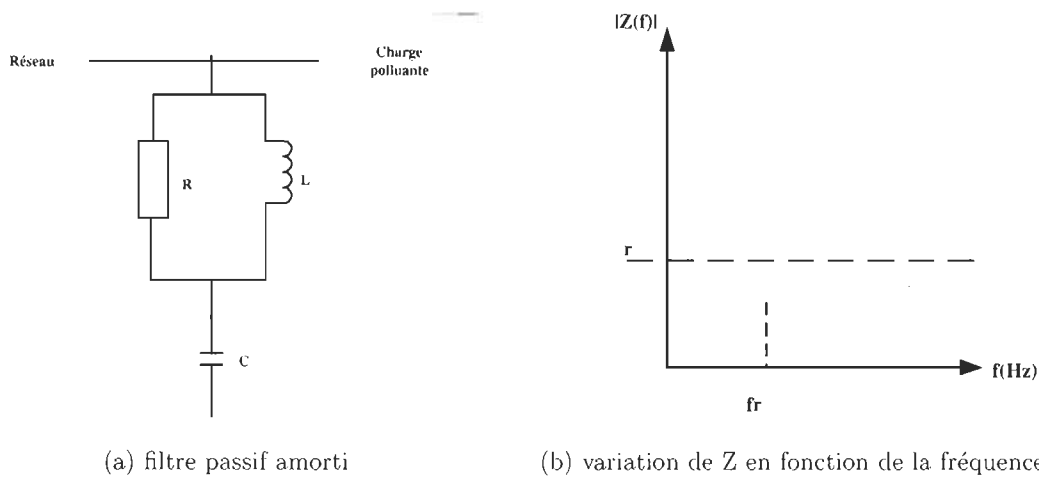


FIGURE 2.10 – Filtre Passif Amorti et Variation de Z en Fonction de la Fréquence

De même que dans le cas du filtre passif résonant, la fréquence d'accord est déterminée selon la formule (2.6). Par contre, son facteur de qualité est exprimé par :

$$f_q = \frac{r}{L} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot f_r} \quad (2.8)$$

c) Les Inconvénients des Filtres Passifs

Si avec l'utilisation d'un grand nombre de matériels informatiques on est capable de s'en sortir en dimensionnant de façon efficace les câbles, il demeure réel que cette solution ne sera plus valable dès qu'on modifie l'emplacement des équipements ou dès que l'on en ajoute d'autres. Ce sera là une des principales limites des filtres passifs. Toutefois, concevoir un filtre shunt efficace pour enrayer les harmoniques de rang trois est très difficile. D'autre

part, les filtres passifs ont cet inconvénient de ne traiter qu'uniquement les fréquences harmoniques pour lesquelles ils ont été conçus ; en d'autres termes, il faudra prévoir un nouveau filtre passif chaque fois que l'on ciblera une nouvelle fréquence, ce qui peut créer un problème d'encombrement des équipements [33, 12].

2.4 Filtrage Actif

L'utilisation des filtres passifs apporte des solutions au problème des harmoniques. Cependant, la limite de ces filtres se fait sérieusement sentir sur plusieurs plans. Par exemple avec l'acquisition de nouvelles charges non linéaires, dans un site installé, il devient nécessaire de réviser les dispositifs de filtrage du fait que les fréquences d'accord ne seront plus adaptées avec les nouvelles installations. D'autre part, en amassant ces filtres dans le but de limiter plusieurs fréquences harmoniques, on se trouverait en train de constituer des batteries accordées sur des fréquences bien déterminées et statiques. Grâce à l'évolution de l'électronique de puissance notamment avec l'apparition des IGBT et GTO réputés avec leur mise en fonction et leur blocage au moyen d'une commande, des solutions de dépollution modernes, plus intéressantes sont proposées. L'avènement du filtrage actif permet de résoudre les problèmes dus à la variation de fréquence dans le réseau. Par exemple, la destruction intempestive des condensateurs et des disjoncteurs, l'altération de l'image des écrans de télévision, ou encore l'altération du son dans le cas d'une chaîne HI-FI ou d'un téléphone. Il peut aussi s'agir à long terme de l'échauffement supplémentaire des câbles et transformateurs.

Dans la littérature, des figures reconnues de filtres actifs sont relatées, à l'exemple de filtre actif parallèle, filtre actif série et leurs combinaisons, ainsi que des structures hybrides, selon une classification par leur topologie. Les filtres actifs peuvent aussi être classés selon leur circuit d'électronique de puissance, ou encore selon la stratégie de contrôle-commande mise en place.

a) Filtre Actif Série

Le filtre actif série (cf. Figure 2.11) assure une barrière aux éventuelles tensions perturbées de la source, et en même temps empêche la circulation des courants pollués à travers l'impédance du réseau ; de sorte que la charge à protéger reçoit en permanence une tension sinusoïdale. Il se comporte comme une source contrôlable d'harmonique de tension branchée entre le réseau et la charge à protéger.

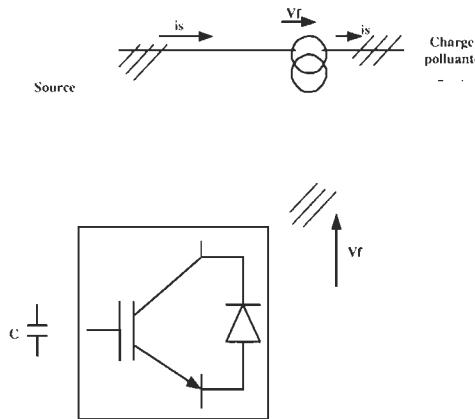


FIGURE 2.11 – Filtre Actif Série

b) Filtre Actif Parallèle

Le filtre actif parallèle peut être considéré comme un compensateur de courants harmoniques pour le réseau dans lequel il est branché. En effet, il empêche la circulation des harmoniques des courants pollués générés par les charges non linéaires du réseau en fournissant les mêmes types de courants harmoniques perturbateurs, mais en opposition de phase avec ceux de ces charges non linéaires ; de sorte que le courant côté réseau reste idéal et sinusoïdal.

On distingue le filtre actif parallèle à structure de courant (Figure 2.12), réalisé avec un onduleur de courant, et le filtre actif parallèle à structure de tension (Figure 2.13) réalisé avec un onduleur de tension.

L'inductance du filtre actif parallèle à structure de courant a pour rôle de stocker l'énergie nécessaire au fonctionnement de la structure ; il tient lieu de source de courant continu.

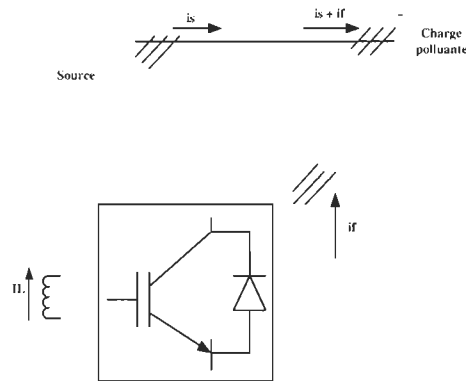


FIGURE 2.12 – Filtre Actif Parallèle à Structure de Courant

Quant au filtre actif parallèle à structure de tension, sa capacité branchée sur l'onduleur assure le rôle de source de tension continue.

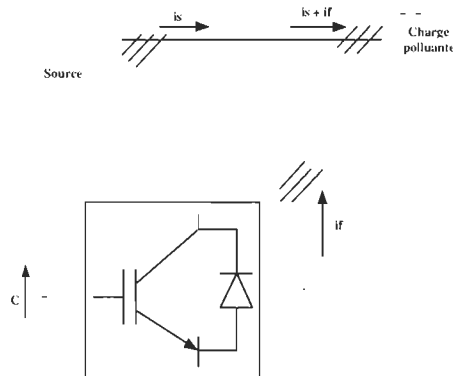


FIGURE 2.13 – Filtre Actif Parallèle à Structure de Tension

c) Combinaison Active Parallèle-Série

La combinaison des filtres actif parallèle et actif série (Figure 2.14) encore appelée Unified Power Quality Conditioner (UPQC) [35], procure l'avantage non seulement d'éliminer les

courants harmoniques, mais aussi d'assurer l'équilibre de la tension, et la puissance réactive.

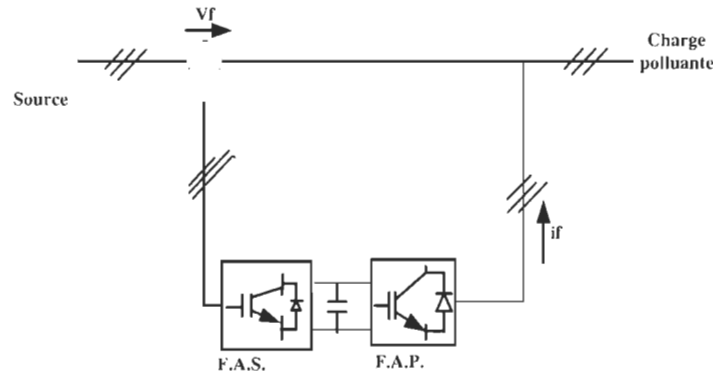


FIGURE 2.14 – Combinaison Active Parallèle-Série (UPQC)

d) Combinaison Hybride entre Filtres Passif et Actif

La combinaison des filtres actifs aux filtres passifs est surtout stratégique, avec pour but d'abaisser les coûts de ces structures. En effet en associant un filtre actif avec un filtre passif, le passif a surtout le rôle principal de piéger la fréquence cible, de sorte que le filtre actif n'a plus qu'à lutter contre le restant des perturbations ; avec pour autre avantage que le filtre actif peut même être monté en série ou en parallèle dans cette combinaison.

Les filtres hybrides les plus rencontrés sont :

- La combinaison entre filtre actif parallèle et filtre passif parallèle (cf. Figure 2.15) ;
- La combinaison entre filtre actif série et filtre passif parallèle (cf. Figure 2.16) ;
- La combinaison entre filtre actif série et filtre passif parallèle en série (cf. Figure 2.17).

1. Combinaison entre Filtre Actif Parallèle et Filtre Passif Parallèle

Cette combinaison concerne un filtre actif parallèle avec un ou plusieurs filtres passifs accordés. On peut rapidement imaginer que ce dernier présente plus d'efficacité à éliminer plusieurs fréquences harmoniques, même ceux du filtre actif parallèle en combi-

naison, mais aussi efficace pour la compensation en énergie et la régulation de la tension de la liaison continue. C'est d'ailleurs cette structure que nous avons adopté pour la réalisation de nos simulations sous le logiciel Matlab/Simulink.

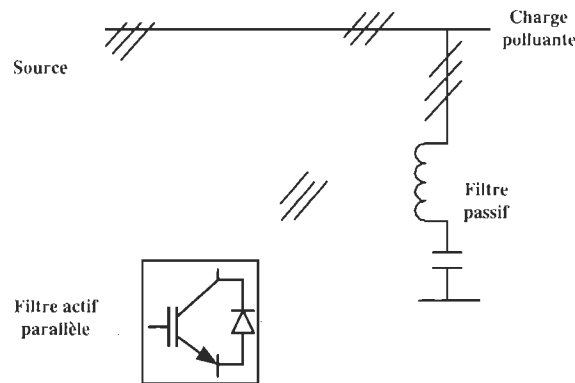


FIGURE 2.15 – Structure Hybride Parallèle

2. Combinaison entre Filtre Actif Série et Filtre Passif Parallèle

Dans cette combinaison, le filtre actif série protège le réseau contre la circulation des courants harmoniques et oblige ces derniers à circuler par les filtres passifs accordés à leurs fréquences.

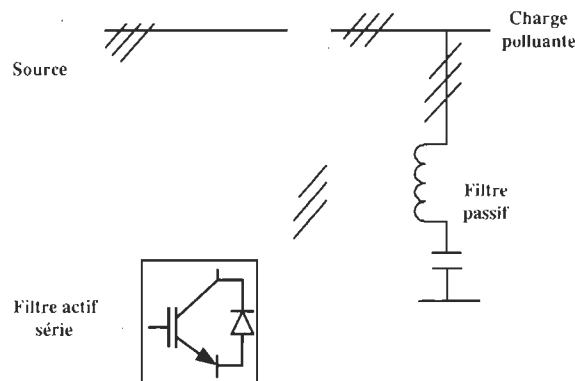


FIGURE 2.16 – Structure Hybride (Série-Parallèle)

3. Combinaison entre Filtre Actif Série et Filtre Passif Parallèle, en Série

Dans ce troisième type de combinaison, les deux filtres sont en série avec pour avantage que le dimensionnement du filtre actif série est allégé puisque le courant qui y circule est faible.

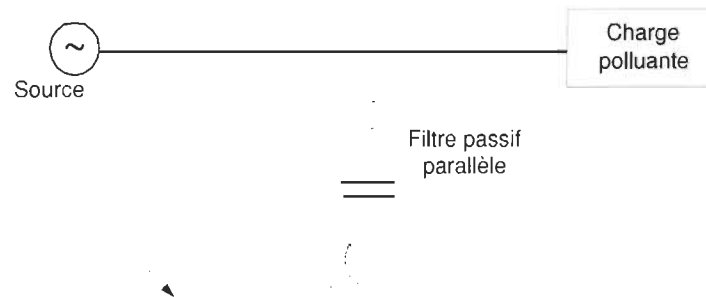


FIGURE 2.17 – Structure Hybride (Parallèle-Série)

2.5 Conclusion

Ce chapitre aura permis de passer en revue les méthodes connues pour la compensation des harmoniques dans les réseaux électriques. Ainsi, nous avons vu les méthodes traditionnelles, surtout avec l'usage des filtres passifs qui présentent l'inconvénient de ne pas pouvoir s'adapter aux variations du réseau tel que le réaménagement des installations, ou encore aux variations des charges polluantes. D'un autre côté, avec les filtres passifs, il risque d'apparaître le problème d'encombrement ; ce qui est peu agréable pour les espaces à exploiter. Les filtres actifs se présentent comme étant une solution moderne ; ils apportent la réponse à tous ces inconvénients et présentent l'avantage de pouvoir rentrer en combinaison avec d'autres filtres actifs et/ou passifs pour former des filtres hybrides encore plus efficaces. Le chapitre suivant nous sera une occasion de rentrer plus dans les

détails du filtrage actif avec le filtre actif parallèle. En annexe .3 sont énumérés quelques critères sur les filtres anti-harmoniques.

Chapitre 3

Filtre Actif Parallèle : Structure, Étude et Stratégie de Commande

3.1 Introduction

Le choix d'une structure de filtrage actif peut être fait selon le type de solution à proposer pour un réseau, de sorte à respecter les critères de fiabilité et à minimiser les coûts. En général, pour un filtre actif, nous rencontrerons deux parties essentielles. La partie puissance, qui comporte la source d'énergie faite d'un élément passif, une capacité ou une inductance. Dans la partie puissance on trouve un onduleur qui est l'élément de base du filtre, et dont le rôle est de fournir le courant commandé à chacune des phases. On y trouve aussi un filtre de couplage qui sert à assurer la transition entre le réseau et l'onduleur. La deuxième partie du filtre actif est la partie commande, qui sert à piloter l'onduleur de la partie puissance.

Dans les lignes qui suivent, nous allons analyser chaque bloc constituant la structure générale du filtre actif parallèle en nous attardant plus et à l'occasion sur les choix que nous avons effectués pour la composition de notre structure pour les différentes simulations réalisées.

Mais d'abord, nous allons commencer par l'étude d'une étape importante et déterminante quant à la qualité et la stabilité du filtre choisi : l'identification des courants et des tensions perturbateurs.

3.2 Structure et Stratégie de Commande

La figure 3.1 montre la structure typique d'un filtre actif parallèle telle que décrite au paragraphe 3.1. En plus des éléments cités de la partie puissance, nous expliquerons aussi les principaux éléments de la partie contrôle et commande.

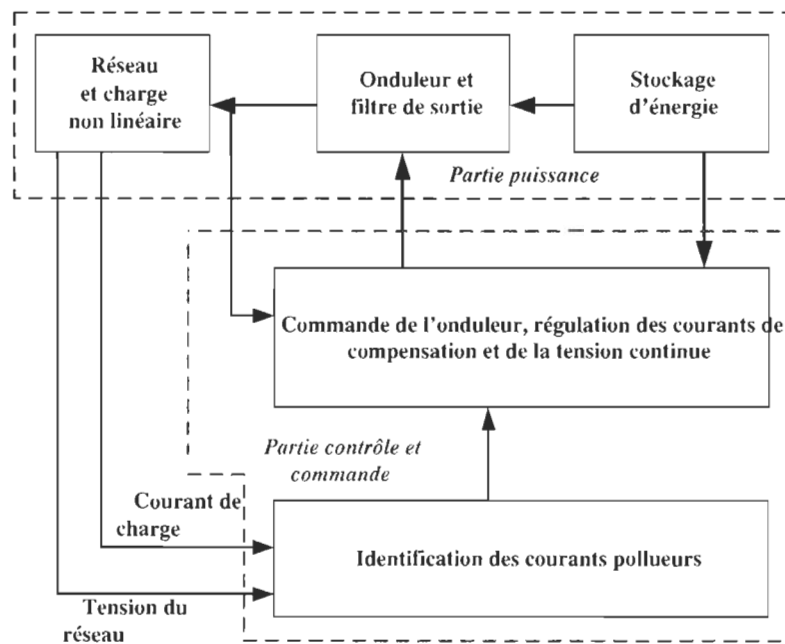


FIGURE 3.1 – Structure Générale du Filtre Actif Parallèle

3.2.1 Étude de la Partie Puissance

- Onduleur de Tension et Onduleur de Courant, [2]

Deux possibilités se présentent pour la structure de l'onduleur du filtre actif parallèle, soit un onduleur de tension ou un onduleur de courant.

– Onduleur de courant

L'onduleur de courant est principalement caractérisé par son inductance, élément servant de source d'énergie. Pour une structure triphasée (Cf. Figure 3.2), on peut remarquer aussi ses six interrupteurs dont la commande est faite en ouverture et en fermeture, au moyen de semi-conducteurs tels que les transistors de puissance ou des GTO.

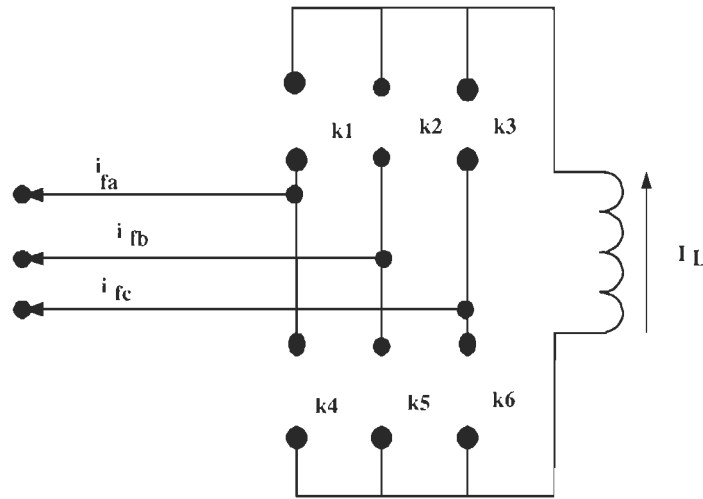


FIGURE 3.2 – Onduleur de Courant Triphasé

Pour la bonne marche du filtre actif, le courant de l'induction doit être maintenu quasi constant. En fonction des commutations des interrupteurs en place, le courant débité aux différentes phases peut prendre les valeurs $-I_L$, 0 , I_L selon les combinaisons du Tableau 3.1.

TABLE 3.1 – Courant de Sortie de l'Onduleur

États	0	1	2	3	4	5	6
i_c	0	0	$-I_L$	0	$-I_L$	I_L	I_L
i_b	0	$-I_L$	0	I_L	I_L	0	$-I_L$
i_a	0	I_L	I_L	$-I_L$	0	$-I_L$	0

– Onduleur de Tension

L'onduleur de tension, contrairement à celui de courant est caractérisé par son élément d'alimentation en énergie qui est un condensateur (cf. Figure 3.3). La tension aux bornes de ce condensateur doit être maintenue constante, les fluctuations possibles ne doivent pas dépasser la limite supportable par les semi-conducteurs en présence.

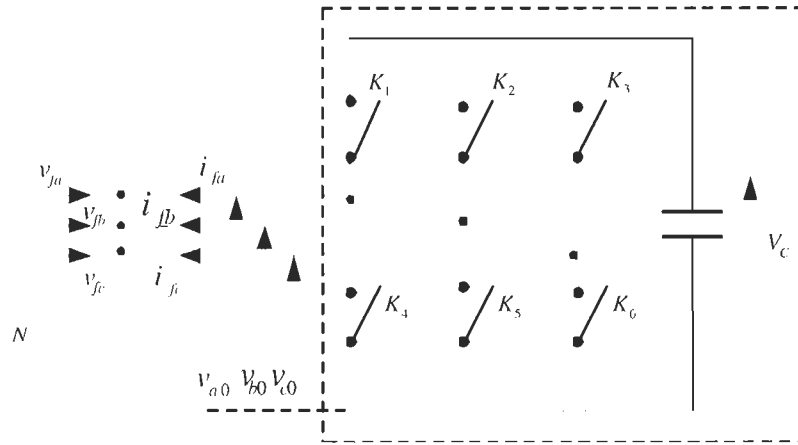


FIGURE 3.3 – Onduleur de Tension Triphasé

Les interrupteurs qui sont bidirectionnels en courant, sont formés par des semi-conducteurs (transistor ou GTO) commandés à l'ouverture et à la fermeture et mis en parallèle avec des diodes (Cf. Figure 3.3). Ces diodes permettent d'assurer la continuité du courant lorsque la tension commute.

Dans sa structure générale, on distingue les tensions de branches V_{a0} , V_{b0} , V_{c0} , mesurées par rapport à la borne négative de l'élément de stockage (capacité V_c), et les tensions de phases mesurées par rapport à un neutre flottant V_{fa} , V_{fb} , V_{fc} . Les semi-conducteurs d'un même bras de l'onduleur sont commandés de façon alternée, la conduction de l'un entraînant le blocage de l'autre. Le fonctionnement de l'onduleur se déroule de manière à ce que les semi-conducteurs d'un même bras ne sont jamais fermés simultanément, au risque de voir le condensateur de stockage V_c court-circuité. En effet, les semi-conducteurs du même bras peuvent être ouverts pendant un temps défini comme

étant un temps mort afin d'éviter ce risque. Les tensions à la sortie de l'onduleur sont déterminées par :

$$-\nu_{a0} + \nu_{fa} - \nu_{fb} + \nu_{b0} = 0 \quad (3.1)$$

$$-\nu_{a0} + \nu_{fa} - \nu_{fc} + \nu_{c0} = 0 \quad (3.2)$$

Pour une charge triphasée équilibrée, sans composante homopolaire et avec un point neutre flottant, on a les relations :

$$\nu_{fa} + \nu_{fb} + \nu_{fc} = 0 \quad (3.3)$$

$$i_{fa} + i_{fb} + i_{fc} = 0 \quad (3.4)$$

Finalement, au moyen de la combinaison des équations 3-1 à 3-4 on détermine les tensions de phase par :

$$\nu_{fa} = \frac{1}{3} [2\nu_{a0} - \nu_{b0} - \nu_{c0}] \quad (3.5)$$

$$\nu_{fb} = \frac{1}{3} [2\nu_{b0} - \nu_{a0} - \nu_{c0}] \quad (3.6)$$

$$\nu_{fc} = \frac{1}{3} [2\nu_{c0} - \nu_{b0} - \nu_{a0}] \quad (3.7)$$

Avec l'état des signaux de commande S_1, S_2, S_3 disposés comme suit :

$$S_1 \begin{cases} 1 & K_1 \text{ fermé et } K_4 \text{ ouvert} \\ 0 & K_1 \text{ ouvert et } K_4 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_2 \begin{cases} 1 & K_2 \text{ fermé et } K_5 \text{ ouvert} \\ 0 & K_2 \text{ ouvert et } K_5 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_3 \begin{cases} 1 & K_3 \text{ fermé et } K_6 \text{ ouvert} \\ 0 & K_3 \text{ ouvert et } K_6 \text{ fermé} \end{cases}$$

On peut prévoir huit cas possibles pour les tensions de sortie de l'onduleur, référés au neutre de la source (cf. Tableau 3.2).

TABLE 3.2 – Tensions de Sortie de l'Onduleur de Tension

État	S_3	S_2	S_1	V_{f3}	V_{f2}	V_{f1}
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	$-V_c/3$	$-V_c/3$	$2V_c/3$
2	0	1	0	$-V_c/3$	$2V_c/3$	$-V_c/3$
3	0	1	1	$-2V_c/3$	$V_c/3$	$V_c/3$
4	1	0	0	$2V_c/3$	$-V_c/3$	$-V_c/3$
5	1	0	1	$V_c/3$	$-2V_c/3$	$V_c/3$
6	1	1	0	$V_c/3$	$V_c/3$	$-2V_c/3$
7	1	1	1	0	0	0

• Système de Stockage d'Énergie

De fait, les filtres actifs sont différenciés par la nature même de l'élément de stockage. Les filtres à stockage inductif mettent en œuvre un filtrage actif parallèle à structure de courant. Le système de stockage doit demeurer aussi stable que possible pour ne pas altérer la qualité du filtrage. Cette forme de stockage est mieux adaptée pour de fortes puissances.

Les filtres à stockage capacitif quant à eux mettent en œuvre un filtrage actif à structure de tension. Pour son fonctionnement, la tension V_c est maintenue constante afin de remédier aux fluctuations qui peuvent affecter la qualité du filtrage. En pratique, il revient moins coûteux d'adopter le filtrage actif parallèle à structure de tension. C'est bien ce qui fait l'objet de notre choix pour les simulations (Cf. Figure 3.4).

• Filtre de Sortie

Le filtre de sortie a pour rôle d'assurer la liaison entre le réseau et l'onduleur de tension ou l'onduleur de courant ; ce filtre est de type passif (cf. Figure 3.4).

Le filtre de sortie est dimensionné pour assurer en permanence l'équilibre dynamique entre le courant de charge harmonique \vec{I}_{ch-H} et celui injecté par l'onduleur du filtre actif

parallèle \vec{I}_f :

$$\frac{d}{dt} \vec{I}_{ch-H} = \frac{d}{dt} \vec{I}_f \quad (3.8)$$

Le filtre de sortie est aussi calibré pour empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau.

Dans notre cas, nous avons en simulation une structure avec un onduleur de tension, et le filtre de sortie est de nature inductive L_f (cf. Figure 3.4). Ce filtre de sortie permet de réduire les harmoniques autour de la fréquence de commutation. lorsque sa valeur est élevée, avec tout de même un risque d'amoindrir la capacité de compensation de la structure. Par contre lorsque la valeur de l'inductance L_f est faible, la majorité des composantes dues aux commutations pourraient se retrouver dans le réseau avec pour risque d'affecter les équipements et les installations électriques.

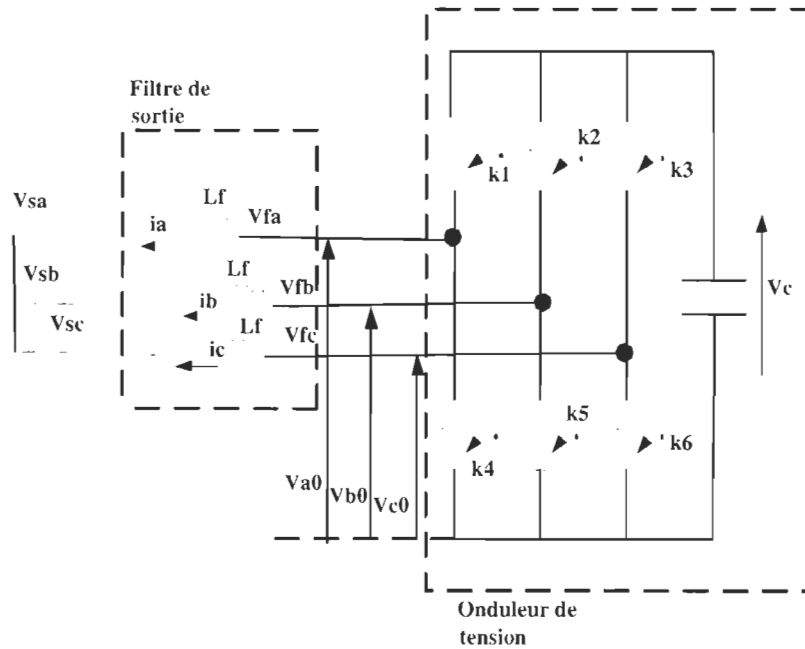


FIGURE 3.4 – Filtre Actif Parallèle de Type Tension

Il existe d'autres possibilités en matière de filtre de sortie du premier ordre tel que l'ajout d'un filtre passif auxiliaire à la sortie de l'onduleur, ou en amont du côté réseau. Cepen-

dant, il peut y avoir un risque de provoquer de la résonance avec d'autres éléments passifs du réseau ou encore de voir la qualité de filtrage affectée pour cause de vieillissement de leurs éléments passifs. Toutefois, une autre solution est envisageable, avec l'usage d'un filtre de troisième ordre LCL (cf. Figure 3.5), avec lequel la capacité de filtrage est améliorée, les valeurs de sortie à de petites fréquences de commutations sont bonnes et la performance dynamique reste de qualité sous des valeurs d'inductance assez petites.

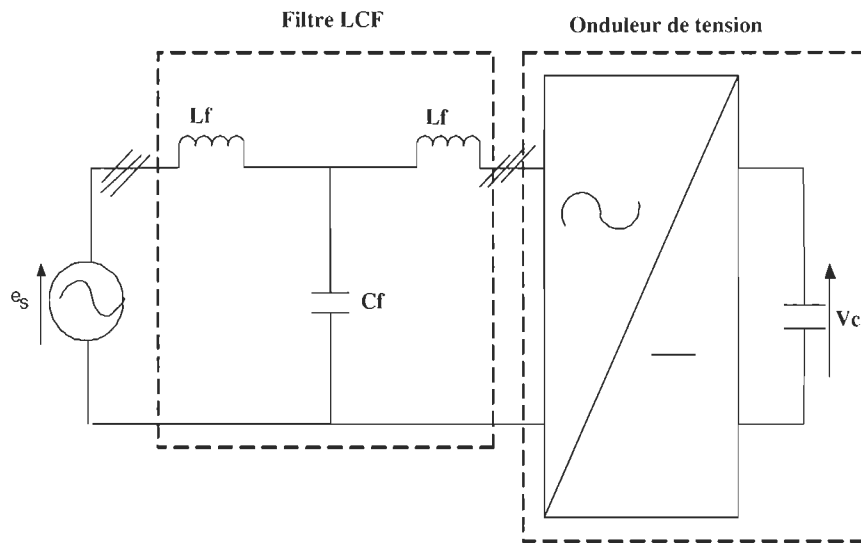


FIGURE 3.5 – Onduleur de Tension avec Filtre LCL

3.2.2 Étude de la Partie Commande

La génération des signaux de contrôle de l'onduleur est très déterminante quant à la reproduction des courants de référence perturbés. Dans la littérature scientifique, on rencontre plusieurs méthodes ; la modulation de largeur d'impulsion (MLI), l'hystérésis, la modulation vectorielle dans l'espace pour ne citer que celles là. Dans ce paragraphe, nous allons présenter les deux premières méthodes citées et discuter de la boucle de régulation de l'onduleur.

• Commande par Hystérésis

Une meilleure reproduction par l'onduleur de courants perturbés permet de déterminer l'efficacité du filtrage. Pour arriver à ce but, il existe en général deux techniques rapportées dans la littérature : la commande par hystérésis (cf. Figure 3.6) et la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) (cf. Figure 3.8).

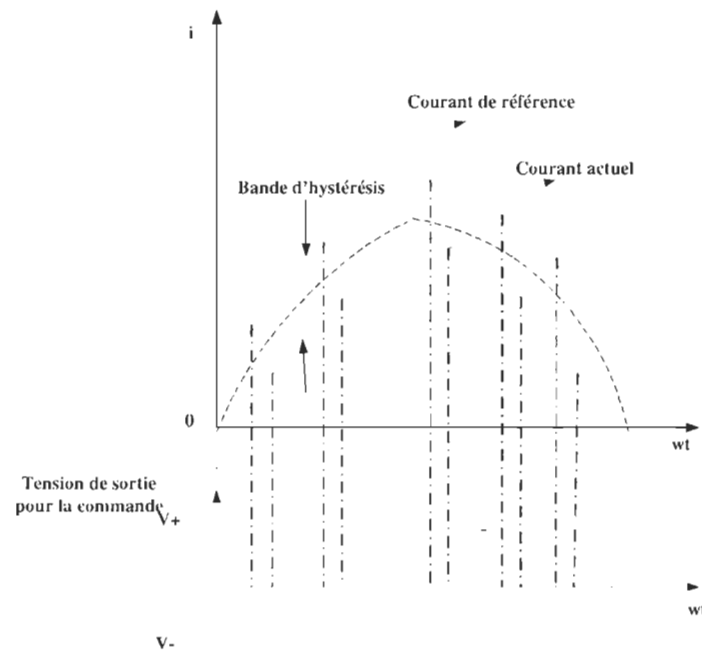


FIGURE 3.6 – Forme d'Onde de Courant et de Tension pour une Commande par Hystérésis

La commande par hystérésis, encore connue sous la dénomination de commande du tout ou rien, est une commande non linéaire basée sur la différence entre le courant de référence et le courant issu de l'onduleur. Le principe consiste à envelopper ou délimiter les courants générés I_{inj} dans une bande de courant de référence I_{ref} . Le résultat est repris par le régulateur qui produit alors un signal logique Ck qui est finalement transformé dans la commande logique C.L. en signal d'enclenchement des semi-conducteurs de l'onduleur (Cf. Figure 3.7).

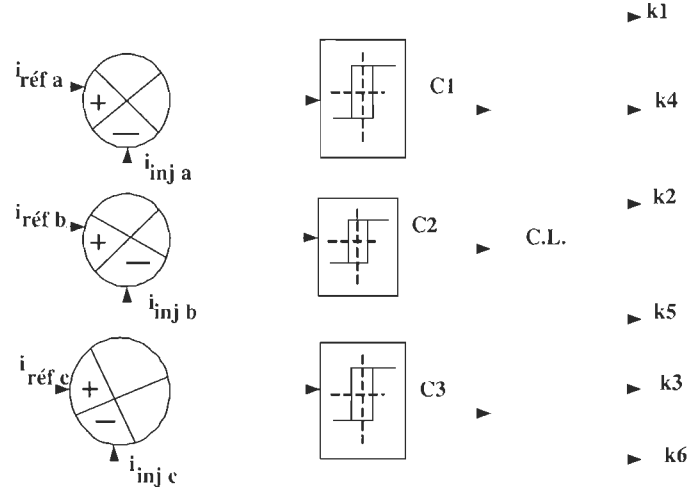


FIGURE 3.7 – Représentation Schématique du Principe de la Commande par Hystérésis

- **Commande par Modulation de Largeur d'Impulsion, [22]**

La technique de modulation de largeur d'impulsion est utilisée pour des circuits à états discrets. Le type le plus utilisé est la MLI intersective, basée sur la comparaison de la modulante (signal à synthétiser) à la porteuse (signal triangulaire). à la sortie, le signal vaut 1 (niveau haut) si la modulante est plus grande que le signal triangulaire, et 0 (niveau bas) si c'est le contraire.

Dans le cas d'un onduleur triphasé (Cf. Figure 3.8) on a trois signaux de référence correspondant respectivement à chacun des bras de l'onduleur. Le générateur de signaux triangulaire (1) transmet sur chaque branche les signaux auxiliaires v_{m1} , v_{m2} , v_{m3} ; ces derniers sont comparés avec les signaux de référence V_{ref1} , V_{ref2} , V_{ref3} et le résultat est traité par chacun des régulateurs à deux positions (2) pour obtenir les signaux logiques c1, c2, c3, lesquels sont exploités dans la commande logique pour finalement générer les signaux de commande (K1...K6) des semi-conducteurs de l'onduleur.

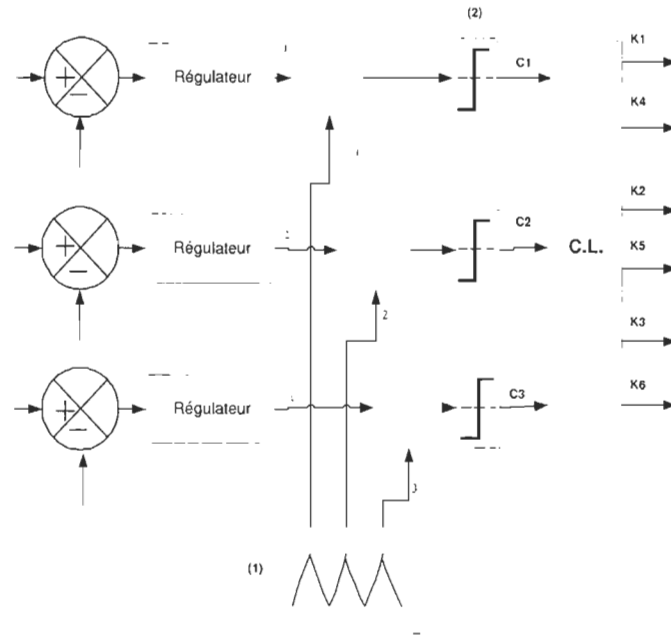


FIGURE 3.8 – Représentation schématique de la commande par MLI

- **Régulation de la Tension V_c de l'Élément de Stockage**

L'onduleur est tenu à fournir en tout temps les courants de compensation harmonique dans le réseau. Et pour atteindre ce but, il faut qu'il soit alimenté par une source d'énergie stable. La boucle d'asservissement de la tension V_{DC} permet de réaliser cette stabilité car le courant de compensation i_{inj} présente des erreurs en estimation, et de plus il y a des pertes internes dans le filtre. Tout ceci amènerait l'onduleur à consommer ou à fournir de la puissance active, de sorte que la valeur moyenne de la tension V_{DC} va augmenter ou diminuer.

- **Les Éléments de la Boucle de Régulation**

Dans le réseau, il se passe un transfert de puissance active concernant la charge polluante, le filtre actif et le réseau lui-même. Ce transfert de puissance se traduit par une variation de la tension continue V_{DC} aux bornes du condensateur.

Le condensateur C , connecté sur le bus continu de l'onduleur, constitue un réservoir d'énergie susceptible de fournir à la charge non linéaire la puissance déformante due aux courants harmoniques $\tilde{P}_f(t)$.

Suite à une variation de charge positive, la tension du filtre actif sera affectée par une fluctuation de tension qui se traduit par une différence entre la grandeur de référence V_{Ref} et la grandeur mesurée V_{DC} . A cette variation de tension correspond une différence d'énergie pendant un temps T_0 :

$$\Delta V_{DC}(t) = V_{\text{Ref}} - V_{DC} \quad (3.9)$$

$$\Rightarrow \Delta \omega_{DC} = \omega_{\text{Ref}} - \omega_{DC} = 1/2C_f(V_{\text{Ref}}^2 - V_{DC}^2) \quad (3.10)$$

$$\Delta \omega_{DC} = (3 \cdot V_s I_0) \cdot t_0 \quad (3.11)$$

La variation de tension correspondante est exprimée par la formule :

$$P_f = P_C - P_S = 3V_s(I_{C1} \cos(\varphi_1) - I_S) = \pm 3V_s I_0 \quad (3.12)$$

avec :

$I_0 = |I_{C1} \cos(\varphi_1) - I_S|$: Courant fondamental actif pour assurer l'équilibre des puissances actives, après une variation de charge.

I_{C1} : Valeur efficace du courant harmonique de rang 1

P_f : Puissance injectée par l'onduleur

P_C : Puissance active consommée par la charge

V_s : Tension source

$\cos(\varphi_1)$: Déphasage sur le courant fondamental

La régulation de la tension continue en elle-même consiste à ajouter à la puissance harmonique \tilde{P}_C , une consigne de la puissance active P_f (Cf. Figure 3.9, principe de régulation de la tension continue).

Dans le cadre de notre travail, pour assurer la régulation et la stabilité de la tension continue du filtre actif parallèle, nous avons adopté un régulateur Proportionnel Intégral.

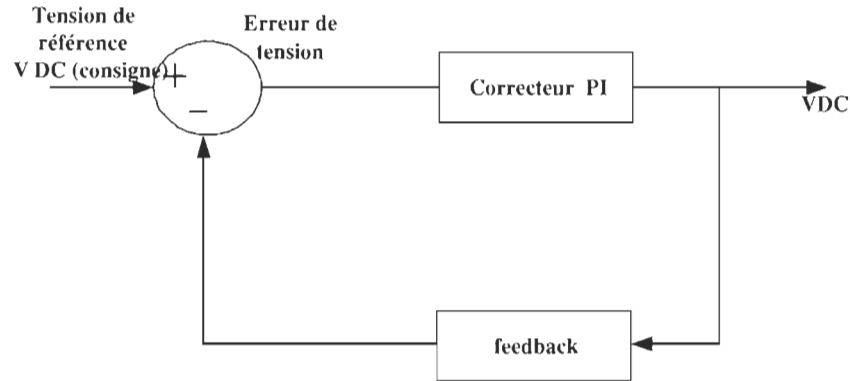


FIGURE 3.9 – Schéma du Principe de la Régulation de la Tension Continue

Sa fonction de transfert est donnée par la formule :

$$C_p = K_P + \frac{K_i}{P} \quad (3.13)$$

avec :

K_P : gain proportionnel

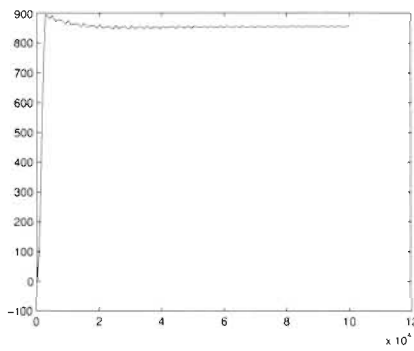
K_i : gain intégral

TABLE 3.3 – Paramètres de Simulations

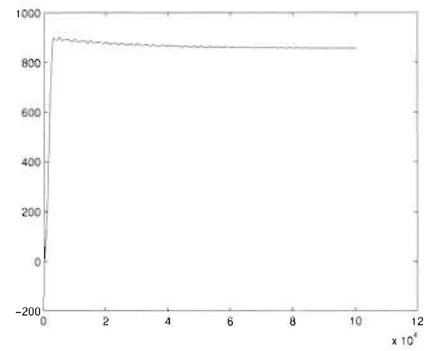
Régulateur Proportionnel Intégral	
Gain proportionnel (K_p)	0.1
Gain intégral (K_i)	1
Limites [Supérieure Inférieure]	[1e6 -1e6]
Valeur initiale	0
Discretisation	50 e-6

Pour la validation par simulation, le tableau 3.3 donne les paramètres de simulations. Nous avons procédé à trois types de relevés de tension V_{DC} correspondant, pour le premier (Figure 3.10(a)) à une charge constituée d'un pont de diodes débitant sur un circuit RL de valeurs 10/3 Ohm pour la résistance et 60 e-3H pour l'inductance. Dans

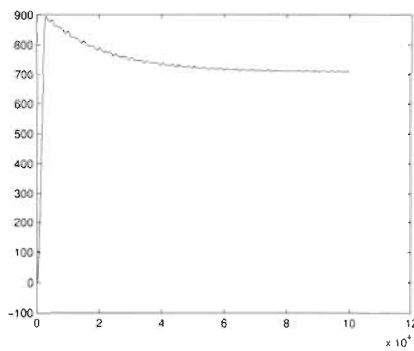
le deuxième relevé de tension, nous avons varié la charge en prenant le pont de diodes qui débite sur un circuit RC de même résistance et de capacité 1.0F : et nous pouvons constater sur la figure (Figure 3.10(b)) que la tension d'alimentation varie aussi. Il est aussi possible d'influencer cette variation en changeant la consigne de tension, la passant par exemple de 850V à 700V pour le même circuit RL (Figure 3.10(c)). La figure 3.10(d) montre le courant de compensation du filtre actif et son analyse spectrale.



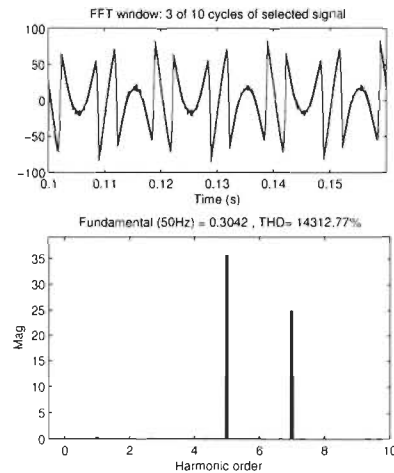
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 3.10 – Simulation sur la Tension Continue

- **Stratégie de Commande et Régulation des Courants de Compensation**

La stratégie de commande du filtre actif que nous avons choisi est basée sur la méthode des puissances réactives instantanées[12. 34. 35].

Par la transformation de Concordia, le système triphasé de tension à la source V_{sa} V_{sb} et V_{sc} de même que le système triphasé de courant de charge I_{ca} I_{cb} et I_{cc} sont respectivement ramenés à des systèmes diphasés selon les équations :

$$\begin{bmatrix} \nu_{s\alpha} \\ \nu_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \nu_{sa} \\ \nu_{sb} \\ \nu_{sc} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$\begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Les puissances instantané active p_L et réactive q_L sont alors déterminées selon :

$$\begin{bmatrix} p_L \\ q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nu_{s\alpha} & \nu_{s\beta} \\ -\nu_{s\beta} & \nu_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Puis à partir des puissances instantanée active et instantanée réactive, on procède à la séparation des puissances harmoniques et fondamentale par un filtre passe-bas, passe haut ou de butterworth d'ordre deux. Par la suite, il ne reste que la partie relative aux harmoniques, selon les équations (3.17) et (3.18). Le filtre de butterworth a la spécificité d'un filtre linéaire, dont l'action consiste à amplifier ou à inhiber certaines composantes du signal d'entrée. Il est conçu pour garder son gain aussi constant qu'envisageable dans sa bande passante. Et lorsque l'on tend vers la bande de coupure, son gain tend vers zéro (Cf. Figure 3.11). Toute l'implantation de l'algorithme est réalisée selon la figure 3.12.

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (3.17)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (3.18)$$

avec :

\bar{p} et \bar{q} : Composantes des puissances moyennes active et réactive correspondant au courant de charge fondamental (50Hz) ;

\tilde{p} et \tilde{q} : Composantes alternatives liées au courant harmonique.

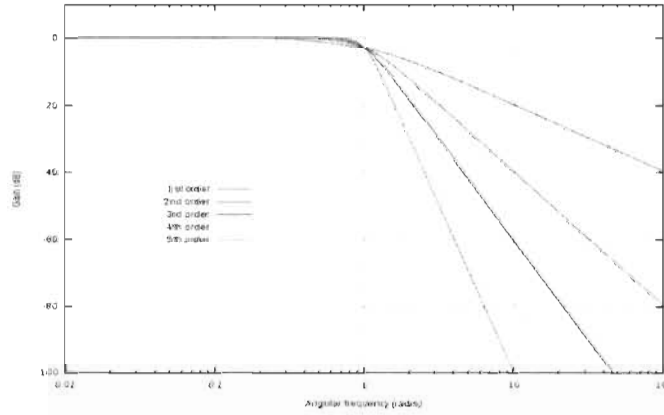


FIGURE 3.11 – Gains du filtre de Butterworth passe-bas d'ordre 1 à 5. La fréquence de coupure est normalisée à 1 rad/s. Le gain est normalisé à 0 dB dans la bande passante [3]

Finalement les courants de référence sont donnés en coordonnées $\alpha - \beta$:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\nu_\alpha^2 + \nu_\beta^2} \begin{bmatrix} \nu_\alpha & \nu_\beta \\ \nu_\beta & -\nu_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Puis transformés dans le système triphasé par :

$$\begin{bmatrix} i_{CA}^* \\ i_{CB}^* \\ i_{CC}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

La figure 3.12 présente le schéma bloc de l'implantation de l'algorithme des puissances instantanées utilisé. On peut y voir les différents blocs de transformation. Le filtre de Butterworth est celui utilisé pour la séparation des puissances, dans les blocs à filtre passe bas. La boucle de régulation de la tension VDC s'y intègre au niveau de la détermination

de composantes harmoniques p^* et q^* avec :

$$p^* = \tilde{p}, q^* = \tilde{q} \quad (3.21)$$

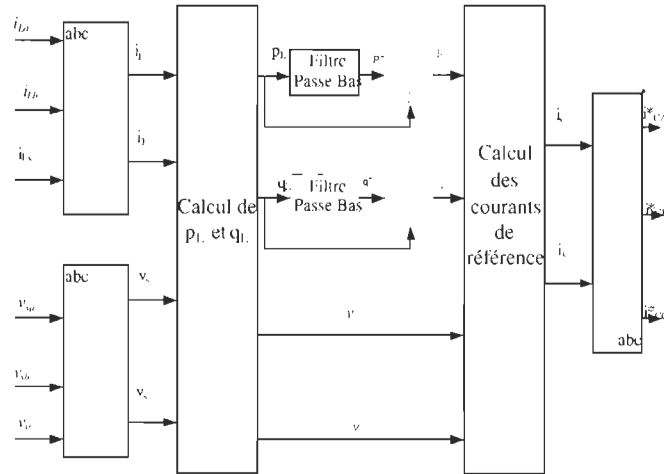


FIGURE 3.12 – Schéma Bloc d'Implantation de l'Algorithme

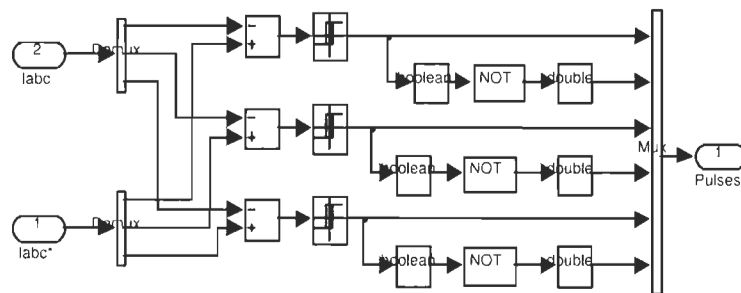


FIGURE 3.13 – Schéma Bloc du Diagramme Hystérésis des Courants de Référence et de Ligne

Les courants de référence trouvés permettent de déterminer les signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur de tension et cela par les impulsions générées à partir du diagramme hystérésis du bloc hystérésis control (Cf. Figure 3.13).

3.3 Conclusion

Le chapitre 3 nous a permis de comprendre la structure du filtre actif parallèle. Il en ressort principalement que l'efficacité et la fiabilité de ce filtre sont tenus surtout dans le choix des éléments de la partie commande, notamment la méthode d'identification des courants pollueurs et la méthode de génération des signaux de commande des semi-conducteurs de l'onduleur. Cette description nous a aussi permis de faire nos choix pour ce qui est de la plate forme expérimentale de travail, Matlab/Simulink. Dans le prochain chapitre, nous allons rentrer dans les détails de notre circuit de travail et donner les résultats de nos simulations sous le logiciel Matlab/Simulink.

Chapitre 4

Étude Comparative par Simulation

4.1 Introduction

Notre objectif dans ce chapitre est de détailler par l'application, le fonctionnement du filtre actif parallèle associé au filtre passif pour la compensation des courants harmoniques, dans un réseau équilibré. Nous allons montrer les changements qui arrivent lors de l'installation sur le réseau d'un filtre passif seul. Le fonctionnement de ce filtre peut être perçu comme un circuit de dérivation qui propose un chemin facile pour les harmoniques visés, de sorte à éviter leur circulation dans le réseau. Dans un second temps, on va considérer le réseau avec un filtre actif seul. Le fonctionnement de ce filtre consiste à compenser les harmoniques provoqués par la charge non linéaire dans le réseau, par injection d'ondes similaires et en opposition de phase dans le point de connexion sur le réseau, de manière à rétablir un réseau sinusoïdal. Enfin, le filtre hybride permettra de montrer l'efficacité des deux filtres connectés ensemble. L'outil de simulation Matlab/Simulink est celui que nous avons utilisé pour l'ensemble du travail de simulation.

4.2 Présentation des Montages sous Simulink et Résultats de Simulation

Le schéma bloc du montage étudié est composé de trois parties :

- Le réseau d'alimentation
- La charge polluante (charge non linéaire)
- Le filtre hybride

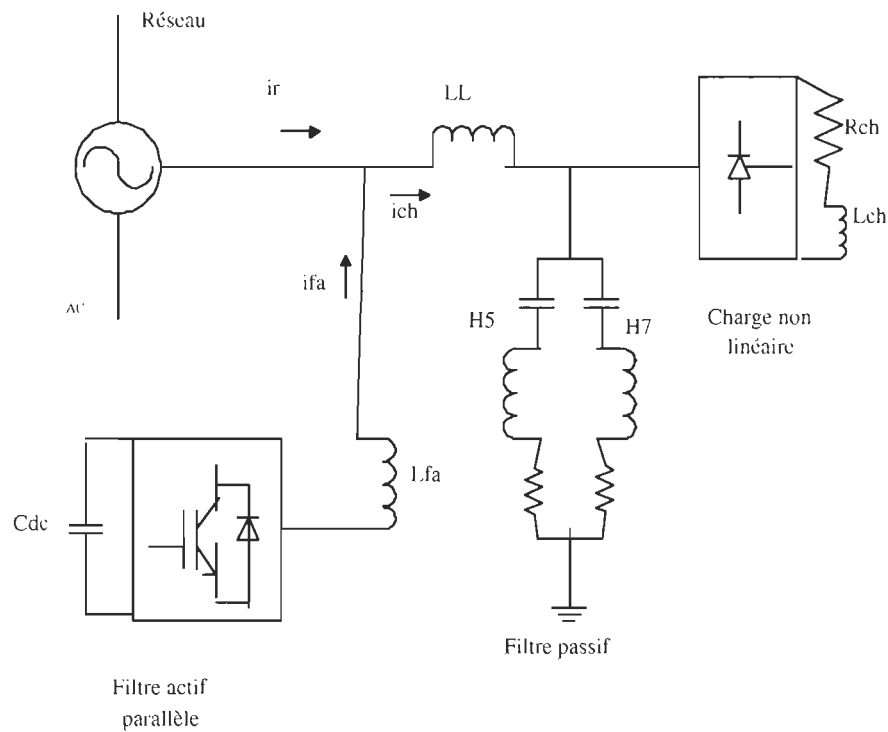


FIGURE 4.1 – Schéma Unifilaire du Montage avec Filtre Hybride

Dans le but d'alléger la complexité de cas et ainsi permettre un meilleur filtrage, nous avons choisi comme charge non linéaire un redresseur à diodes débitant sur un circuit RL, comme le montre le schéma unifilaire (Figure 4.1). Les paramètres du montage sont donnés dans le tableau 4.1, les conditions de prélèvement pour l'analyse spectrale (FFT analyse) sont données par le tableau 4.2, et les résultats de simulation par la figure 4.2.

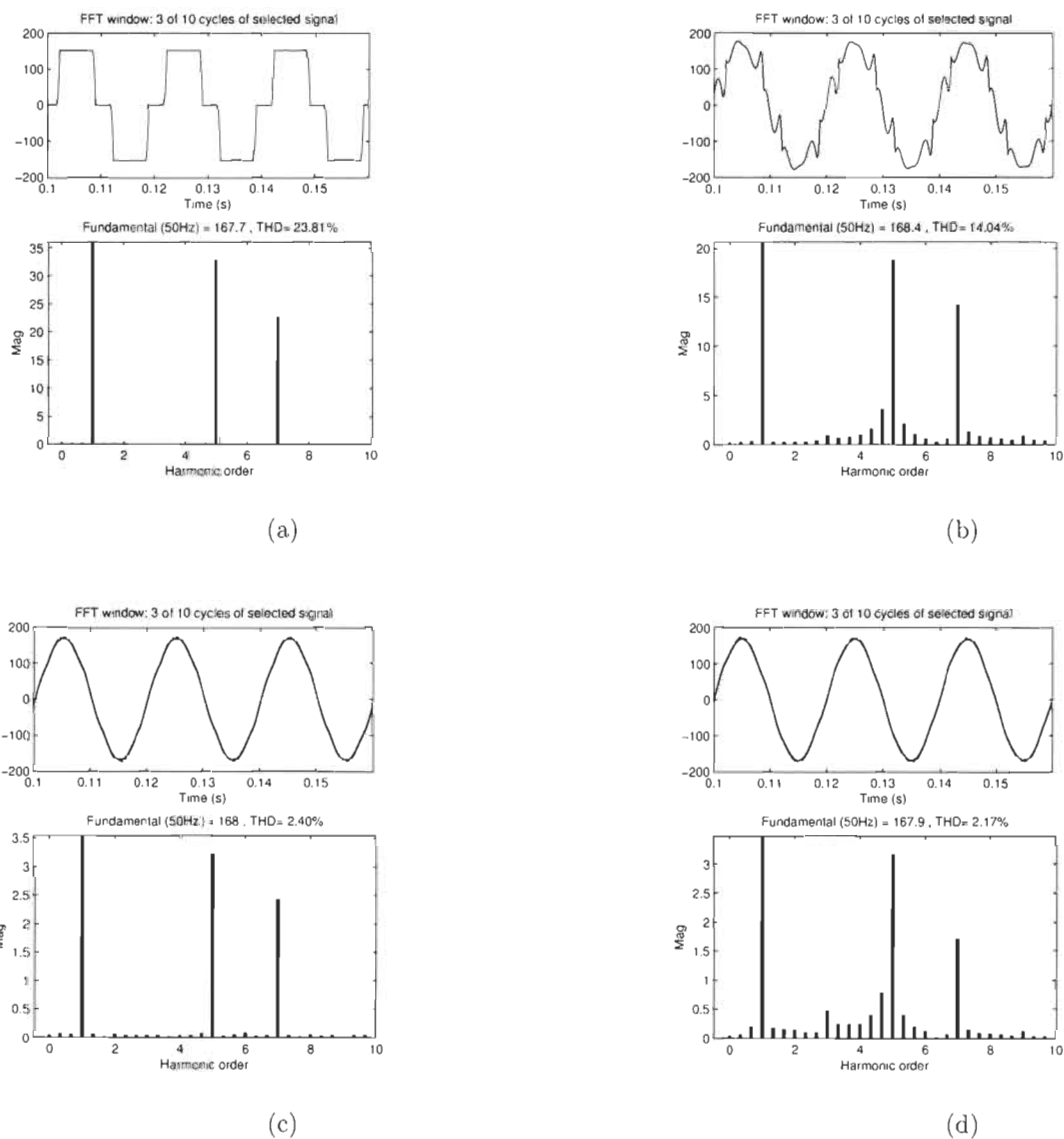


FIGURE 4.2 – Résultat des Simulations du Réseau avec Filtrage et Sans Filtrage

TABLE 4.1 – Caractéristiques du Montage

Éléments du montage	Valeurs
Tension source (V_s)	220 V
Fréquence (f)	50 Hz
Inductance (L_s)	19.26 e-7 H
Résistance charge (Rch)	10/3 Ω
Inductance de charge (Lch)	60 e-3 H

TABLE 4.2 – Paramètres de Simulation pour la FFT

Start time (s)	0.1
Nombres de cycles	3
Fréquence fondamentale (Hz)	50
Max fréquence (Hz)	500

4.2.1 Étude sans Filtre

Cette première partie des simulations consiste à présenter l'influence dans le réseau de la charge non linéaire; pour cela nous avons d'abord débranché tout filtre du réseau (Cf. Figure 4.3). Le pont redresseur génère des courants non sinusoïdaux qui contribuent à polluer le reste du réseau étudié; d'où les formes de courant observées sur la figure 4.2(a).

Sur les trois périodes du régime permanent zoomées, on peut voir la forme du courant qui circule dans tout le réseau pollué (coté charge et coté source). On arrive facilement à remarquer la nette présence des fréquences harmoniques d'ordre 5 et 7. Et surtout le TDH qui est à 23.81% (Cf. Figure 4.2(a)).

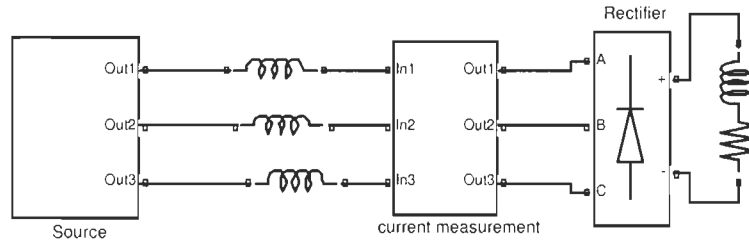


FIGURE 4.3 – Schéma Bloc du Réseau Simulé sans Filtre

4.2.2 Étude avec Filtre Passif

La conception d'un filtre passif composé d'un groupement de deux circuits résonant série (single-tuned filter), est le choix que nous avons effectué pour éliminer les harmoniques d'ordre 5 et d'ordre 7. Les deux filtres sont combinés en un seul circuit qui est branché au réseau par le moyen d'un breaker dont l'ouverture et la fermeture sont contrôlé à l'externe par un signal logique (Figure 4.4). Les paramètres des deux cellules sont déterminés comme suit à la lumière des instructions du SimPowerSystems du logiciel Matlab/Simulink.

Fréquences de coupure visées

$$n \times f = f_c \quad (4.1)$$

Application numérique : $5 \times 50 = 250Hz$ et $7 \times 50 = 350Hz$

Nous fixons $R = 1000\Omega$.

Pour un facteur de qualité de 100, la réactance de l'inductance est

$$Q = n \times X_L / R \Rightarrow X_L = R \times Q / n \quad (4.2)$$

Application numérique : $(1000 \times 100) / 5 = 20000.0\Omega$

La réactance de la capacité est

$$Q = X_C / (n \times R) \Rightarrow X_C = Q \times n \times R \quad (4.3)$$

Application numérique : $1000 \times 5 \times 100 = 5.10e5 \Omega$

La capacité du circuit est

$$X_C = \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{2\pi f_0 \times C} \Rightarrow C = \frac{1}{X_C} \times 2\pi \times f_C \quad (4.4)$$

Application numérique : $C = 1 / (5.10e5 \times 2\pi \times 250) = 1.27.10e - 9 F$

La fréquence de coupure : $f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ (eq. 3.6) $\Rightarrow L = \left(\frac{1}{C}\right) \times \left(\frac{1}{(2\pi f_c)^2}\right)$

Application numérique : $\frac{1}{C} \times \frac{1}{(2\pi \times 250)^2} = 318.31 H$

En définitive, ce montage permet de créer une voie facile pour les harmoniques de courant H_5 et H_7 de telle sorte que ne remonteront vers le réseau que les parties des courants harmoniques non absorbées par le filtre passif.

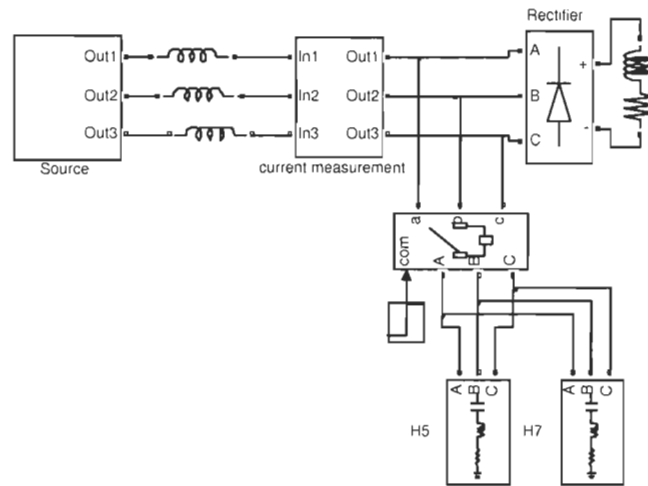


FIGURE 4.4 – Schéma Bloc du Réseau Simulé avec Filtre Passif

Lorsque nous branchons le filtre passif, on peut noter une réelle amélioration du TDH. Il est passé à 14.04% (Cf. Figure 4.2(b)), par rapport au cas précédent sans filtre (Cf. Figure 4.2(a)) où il était à 23.81%.

4.2.3 Étude avec Filtre Actif

Dans le but de montrer l'influence du filtre actif sur le réseau, nous avons débranché le filtre passif et avons effectué la connexion du filtre actif seul selon la figure 4.5.

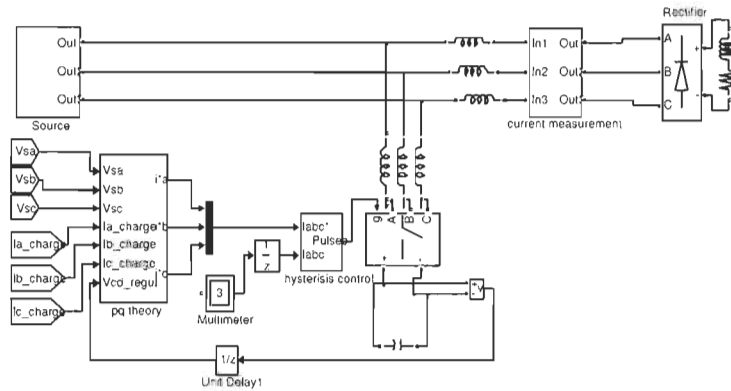


FIGURE 4.5 – Schéma Bloc du Réseau Simulé avec Filtre Actif

On peut remarquer une amélioration nette par rapport au réseau avec filtre passif seul ; le TDH est passé de 14.04% (Cf. Figure 4.2(b)) à une valeur de 2.40% (Cf. Figure 4.2(c)), on peut aussi constater une meilleure atténuation des inter-harmoniques.

4.2.4 Étude avec Filtre Hybride

Le but de cette partie est de montrer l'efficacité de la combinaison des deux filtres travaillant simultanément (cf. Figure 4.6). Le montage est économiquement profitable dans les installations de moyenne et forte puissance, au-dessus de quelques centaines de kilowatts.

Comme on peut le remarquer à partir des résultats, le filtre hybride bénéficiant des apports des filtres passif et actif permet d'améliorer beaucoup plus la qualité de l'onde

pour tout le réseau, en plus de compenser les harmoniques d'ordre 5 et 7. Sous les mêmes conditions de branchement, nous pouvons voir une amélioration encore meilleure lorsque le filtre hybride est branché. Le THD est maintenant descendu de 2.40% à 2.17% (Cf. Figure 4.2(d)).

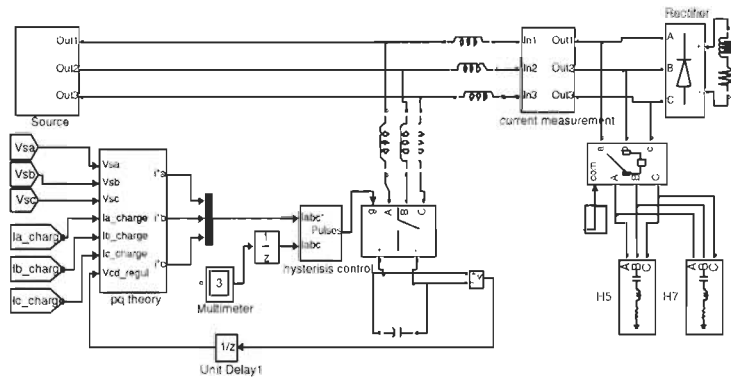


FIGURE 4.6 – Schéma Bloc du Réseau Simulé avec Filtre Hybride

4.2.5 Étude pour une Charge RC

Pour valider ces résultats, nous avons procédé aux mêmes expériences, mais cette fois en associant un circuit RC à la charge polluante. Sur la figure 4.8 nous avons le schéma unifilaire du montage, et sur les figures 4.7a, b, c, et d, les résultats obtenus. Bien que les chiffres diffèrent de ceux des résultats obtenus avec le circuit RL (Cf. Figure 4.2 a, b, c et d), nous remarquons que le filtrage a été effectué de façon satisfaisante.

4.2.6 Utilisation d'un Filtre d'Entrée de Deuxième Ordre (de Type LCL)

Pour cette dernière expérimentation, nous avons placé un filtre d'entrée du deuxième ordre de type LCL (Cf. Figure 4.9) à la place du filtre L de départ. Les paramètres appliqués sont : $L1f = 0.0004269H$, $L2f = 0.0012825H$ et $Cf = 0.000029304F$. Le filtre LCL est

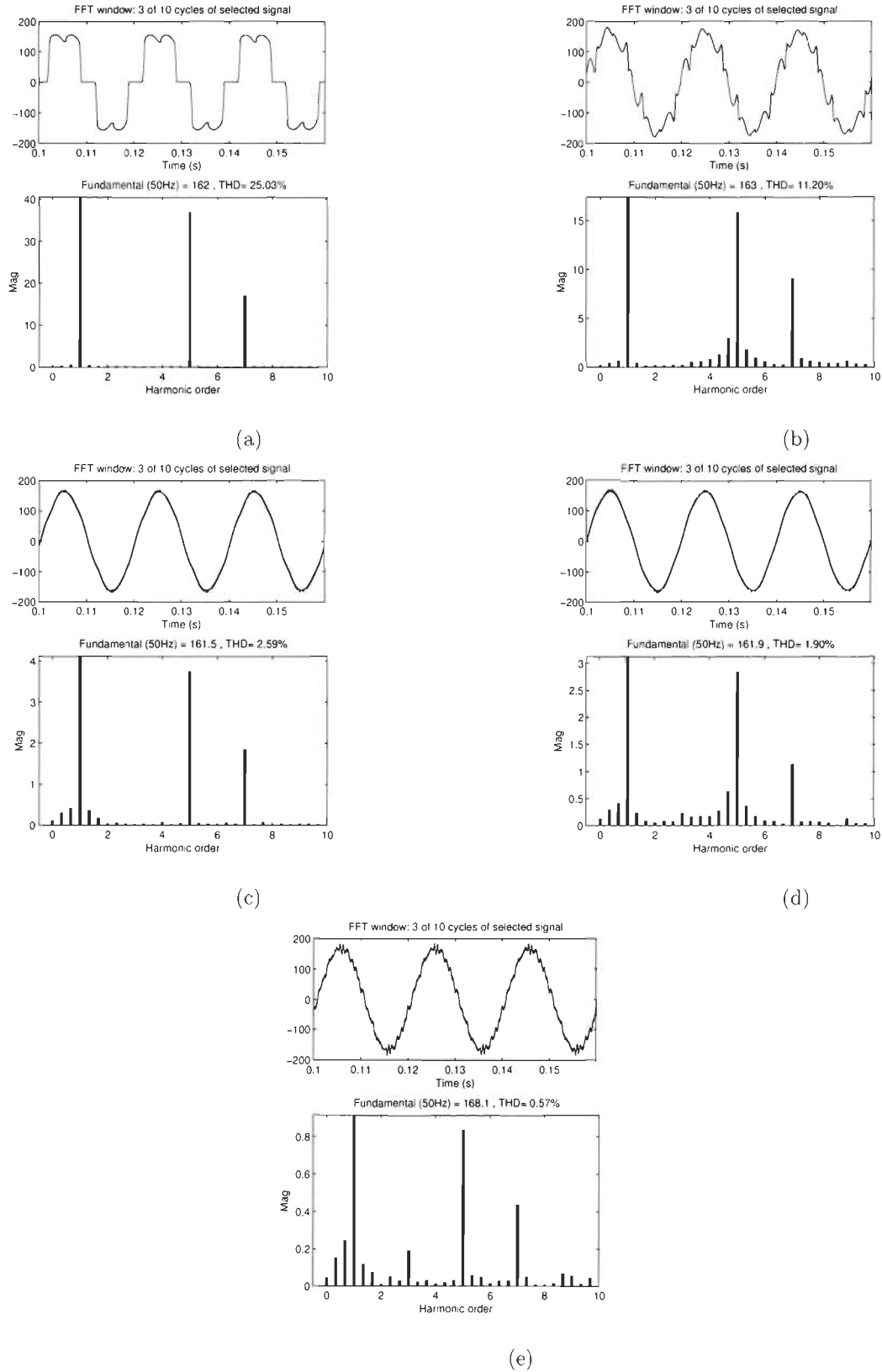


FIGURE 4.7 – Résultat des Simulations pour une Charge RC et un Filtre LCL

efficace pour la réduction des taux de distorsion lors de la commutation. Sur les résultats on constate une légère augmentation du courant et une amélioration satisfaisante du TDH à 0.57% (Cf. Figure 4.7(f)), comparé au cas du réseau avec filtre d'entrée de type L, 1.90% (Cf. Figure 4.7(d)).

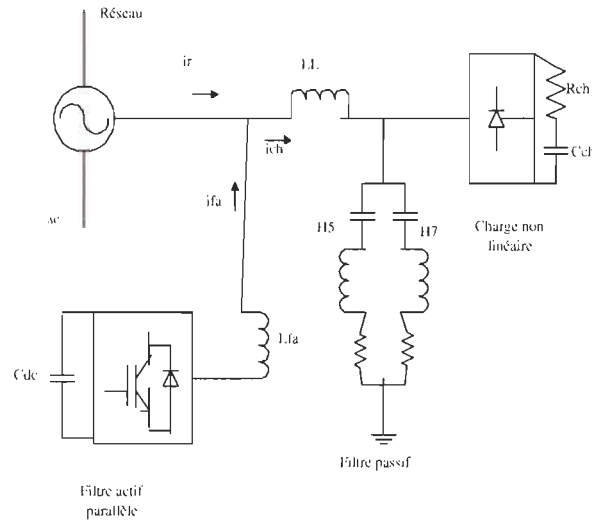


FIGURE 4.8 – Schéma Unifilaire du Réseau avec une Charge RC

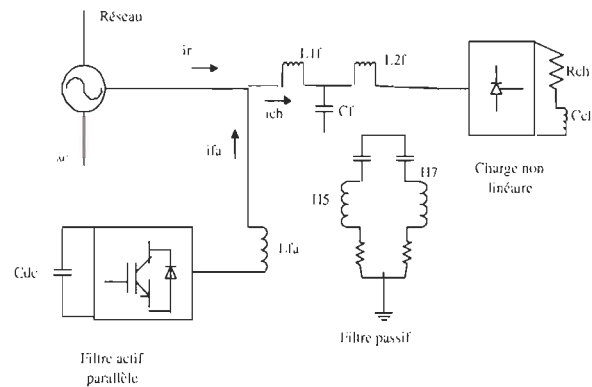


FIGURE 4.9 – Schéma Unifilaire du Réseau avec une Charge RC et un Filtre d'Entrée de Type LCL

4.3 Conclusion

TABLE 4.3 – Tableau Récapitulatif des Taux de Distorsion Harmonique

TDH		
	RL Charge (%)	RC Charge (%)
Réseau sans filtre	23.81	25.03
Réseau avec filtre passif	14.04	11.20
Réseau avec filtre actif	2.40	2.59
Réseau avec filtre hybride	2.17	1.90

Dans ce chapitre, nous avons pu observer par des simulations l'action des filtres pour limiter la propagation des harmoniques et réduire les distorsions de l'onde dans le réseau. Le tableau 4.3 donne un récapitulatif des taux de distorsion harmonique selon les types de charges et des circuits utilisés. Sur le plan avantages et inconvénients de l'utilisation de ces circuits, on peut observer que : avec le filtre passif tout seul, si nous nous fions aux résultats chiffrés, la solution est nette ; les harmoniques 5 et 7 sont sérieusement atténuées, moins de 20% de la fondamentale. Par contre, on note une certaine présence d'autres types d'harmoniques comme ceux de l'ordre 3, et des inters harmoniques à des proportions assez faibles, moins de 5%. Lorsque l'on branche tout seul le filtre actif, les fréquences du 5^{ième} et du 7^{ième} sont baissées autour de 3% de la fondamentale et tout le reste est en dessous de 0.5% autour de la fréquence fondamentale. Les inters harmoniques sont quasi inexistantes dans ce cas. Ceci démontre une bonne performance du filtre. Finalement, il serait avantageux d'utiliser le filtre passif pour des appareils très sensibles à un type spécifique d'harmonique (exemple les ordres 5 et 7), et réserver le filtrage actif pour des compensations multiples. D'autre part, le filtre actif convient le mieux et il est propre à s'adapter à tout type de filtrage d'harmonique. Cependant, il est plus onéreux que le filtre passif. Pour ce qui est du filtre hybride, il permet l'avantage des deux types, actif et passif pour un filtrage très

affiné, avec surtout le TDH qui est alors au plus bas niveau 2.17%. Pour confirmer les performances, des simulations en présence d'une charge RC ont été effectuées avec succès (Cf. Figure 4.7a, b, c, et d). Et lorsqu'on opère avec un filtre d'entrée du deuxième ordre de type LCL, on parvient à obtenir un taux de distorsion encore plus bas, 0.57%. Enfin, on peut faire un classement par ordre de coût et d'implantation décroissants de ces trois filtres comme suit : filtre hybride puis filtre actif et enfin filtre passif.

Chapitre 5

Conclusion Générale

La réalisation de ce travail de mémoire sur les harmoniques, axé sur le filtre actif parallèle à structure de tension, laisse dégager trois moments forts dans les travaux. Dans un premier temps, il a été question de la formulation des équations d'étude de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques, étude qui nous a permis de faire un rapprochement entre l'analyse de l'écoulement de puissance sans prise en compte des harmoniques, pour un réseau idéal tel que utilisé avant l'avènement des semi-conducteurs à l'instar de thyristors et autres transistors de puissance; et l'étude de l'écoulement de puissance faisant rentrer en compte l'influence dans le réseau des charges non linéaires. Cette partie nous a permis de voir comment les auteurs interprétaient et formulaient le problème des harmoniques dans un réseau électrique, en vue d'une utilisation rationnelle et d'une qualité de l'onde acceptable. La résolution de ces problèmes d'écoulement de puissance quant à elle est souvent réalisée grâce aux méthodes de Newton-Raphson et de Gauss-Seidel. Un exemple pratique de ces deux méthodes est donné en annexe (Cf. annexe 3).

La deuxième partie de ce travail fut axée sur la qualité de l'onde avec le filtrage des harmoniques. La grande quantité de travaux axés sur ce sujet permet de considérer l'ampleur et l'influence que peuvent avoir les harmoniques dans un réseau de distribution électrique. Les différents points de recherche que nous avons abordé l'ont été avec pour but de s'ins-

crire dans le contexte des préoccupations industrielles en rapport avec le souci de maintenir une qualité d'onde acceptable pour tout réseau électrique. Dans notre cas, il s'agit d'éliminer les harmoniques de courant et de tension provoqués par la présence des charges non linéaires dans les réseaux électriques. Nous avons examiné l'origine de ces harmoniques et leur conséquence dans un réseau de distribution électrique, puis nous avons entrepris leur compensation notamment par la mise en place de filtres. Plusieurs types de filtres sont réalisables, tout dépend du réseau établi, fixe ou variable et aussi du but à atteindre. Dans le cadre de ce mémoire, nous avons utilisé un filtre hybride, composé par un filtre actif parallèle à structure de tension auquel sont associés deux filtres passifs résonants axés sur les harmoniques de rang 5 et 7. La dépollution ici consiste à la compensation à temps réel des courants harmoniques du réseau, grâce au filtre actif parallèle qui injecte le même type d'onde, mais en opposition de phase avec celle de la source de pollution, de façon à avoir une forme d'onde du courant sinusoïdale délivrée par la source du réseau. En guise de travaux futurs, il serait intéressant de voir l'effet d'une association hybride pour un réseau déséquilibré.

En définitive, le but suivi de cette expérience était de maîtriser le filtrage des harmoniques. Nous avons pu atteindre cet objectif avec l'utilisation du filtre actif parallèle et mieux encore avec l'utilisation du filtre hybride.

Bibliographie

- [1] S. Herraiz, L. Sainz, and A. J. Clua. Review of Harmonic Load Flow Formulations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(3), July 2003.
- [2] J. N. Fiorina. Onduleurs et Harmoniques (cas des charges non linéaires), Juin 1992.
- [3] Filtre de butterworth, [http ://fr.wikipedia.org/wiki/filtre_de_butterworth](http://fr.wikipedia.org/wiki/filtre_de_butterworth).
- [4] H. W. Dommel, W. F. Tinney, and A. W. L. Powell. Further Developments in Newton's Method for Power System Applications. In *Proceedings of the IEEE Winter Power Meeting*, number Paper 70 CP 161 – PWR, Janvier 1970.
- [5] C. Dummortier and P. Enjalbert. Pollution Harmonique Basse Fréquence : Effets et Normes. *Informatique et Réseaux pour l'Industrie et les Services Techniques*, Juin 2002.
- [6] C. Gasquet and P. Witomski. *Analyse de Fourier et Applications : Filtrage, Calcul Numérique et Ondelettes*. 2000.
- [7] J. Arrillaga and A. C. P. Arnold. *Computer Analysis of Power Systems*. Wiley, New York, 1990.
- [8] C. Gasquet and P. Witomski. *Analyse de Fourier et Applications*, Dunod edition, Février 2004.
- [9] D. Chapman. *Harmoniques, Causes et Effets*. Copper Development Association, Juillet 2002.

- [10] E. Bettega and J. N. Fiorina. Harmoniques : Convertisseurs Propres et Compensateurs Actifs, Juin 1998.
- [11] S. Bernard and G. Trochan. Compensation des Courants Harmoniques générés par les ordinateurs grâce à un Compensateur actif d'Harmoniques révolutionnaire, Janvier 2000.
- [12] R. Sanae. études de Méthodes de Filtrage des Harmoniques dans les Réseaux Électriques de Distribution. Génie électrique, Université du Québec à Trois Rivières (UQTR), 2002.
- [13] CEI and IEC. Tensions Normales de la CEI IEC Standard Voltages. *International Electronical Commission*, 6(23), Juillet 2002.
- [14] J. E. V. Ness. Iteration Methods for Digital Load Flow Studies. *AZEE Trans (Pown App. Syst.)*, 78 :583–588, 1959.
- [15] B. Stott. Effective Starting Process for Newton–Raphson Load-Flow. In *Proceedings of the Inst. Ek c. EuE*, volume 118, pages 983–987, 1971.
- [16] H. W. Dommel. *Electromagnetic Transients Programs – Reference Manual*, 1986.
- [17] G. T. Heydt. Electric Power Quality. *Ed. Stars in a Circle Publication*, 1991.
- [18] J. Arrillaga, D. A. Bradley, and P. S. Bodger. *Power System Harmonics*. Wiley, New York, 1983.
- [19] A. Sévigny. Analyse Matricielle d'un Réseau. Support de Cours, 2007.
- [20] H. Le-Huy. Circuits Électriques. Support de Cours, 2004.
- [21] N. R. Watson and J. Arrillaga. Review, Harmonics in Large Systems. *Electric Power Systems Research*, 66, 2003.
- [22] J. Holtz. Pulse with Modulation for Electronic Power Conversion. In *Proceedings of the IEEE*, volume 82, pages 1194–1214, August 1994.
- [23] S. Bernard and G. Trochan. Deuxième Génération de Compensateurs Actifs d'Harmoniques Forte Capacité Basé sur le Mode d'Injection de Courant. 1998.

- [24] S. Karve. Harmoniques, Conditionneurs d'Harmoniques Actifs, Juillet 2002.
- [25] A. O. T. Benmiloud. Régulation de la Tension d'Alimentation du Filtre Actif Parallèle par PI Adaptatif. In *Proceedings of the 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing (CIP)*, 2007.
- [26] R. Grünbaum and J. Perrot. Le SVC Light : un Outil Puissant pour Optimiser le Transport et la Distribution de l'électricité. *ABB Power System AB*, 2001.
- [27] D. O. Abdeslam, P. Wira. J. Mercklé, Y.-A. Chapuis, and D. Flieller. Stratégie Neuromimétique d'Identification et de Commande d'un Filtre Actif Parallèle. *Revue des Systèmes, Série Revue Internationale de Génie Électrique (RS-RIGE)*, 9(1) :35–64, 2006.
- [28] A. Sahbani, M. L. B. Braiek, M. A. Dami, and E. M. Jemli. Commande d'un Filtre Actif Triphasé Shunt par Logique Floue. In *Proceedings of the 3rd International Conference of Electronic, Technologies of Information and Telecommunication (SETIT)*, Tunisia, March 2005.
- [29] R-P. Bouchard and G. Olivier. électrotechnique. 2^{ème} edition. P. i. Polytechnique Ed., 1999.
- [30] F. C. D. L. Rosa. *Harmonics and Power System*. Book C. Press Ed., 2006.
- [31] C. Collombet and J. S. J. M. Lupin. Perturbations Harmoniques dans les réseaux pollués et leur traitement. Cahier Technique 152, Schneider Electric, Septembre 1999.
- [32] M. Gerin. Harmoniques et Transformateurs. Technical Report vol. T6, Schneider Electric, Février 2004.
- [33] S. Bernard. J. N. Fiorina, B. Gros. and G. Trochain. Filtrage THM et Maîtrise des Harmoniques en Amont des ASI, 2000.
- [34] H. Akagi, Y. Tsukamoto, and A. Nabae. Analysis and Design of an Active Power Filter using Quad-Series Voltage Source PWM Converters. *IEEE Transactions on Industry Application*, 26, 1990.

-
- [35] F. Z. Peng, H. Akagi, and A. Nabae. A Study of Active Power Filter using Quad-Series Voltage-Source PWM Converters for Harmonic Compensation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 5, 1990.

Appendices

.1 Étude de l'Écoulement de Puissance par la Méthode Itérative de Gauss-Seidel ainsi que par la Méthode de Newton-Raphson

Le réseau proposé présente 5 jeux de barre et 5 lignes (cf. Figure 1). Le jeu de barre 1 est celui de référence (swing ou slack bus) ; sur le jeu 3 on a un alternateur similaire au jeu 1, c'est un jeu de barre à tension contrôlée. Sur les jeux 2, 4 et 5 sont connectées des charges ; ce sont des jeux PQ (cf. Tableaux 1 et 2). La résolution de l'écoulement de puissance dans ce réseau au moyen du logiciel numérique Matlab nous permet d'expérimenter la méthode conventionnelle ou Conventional Load Flow, ainsi que les méthodes itératives de Newton-Raphson et de Gauss-Seidel.

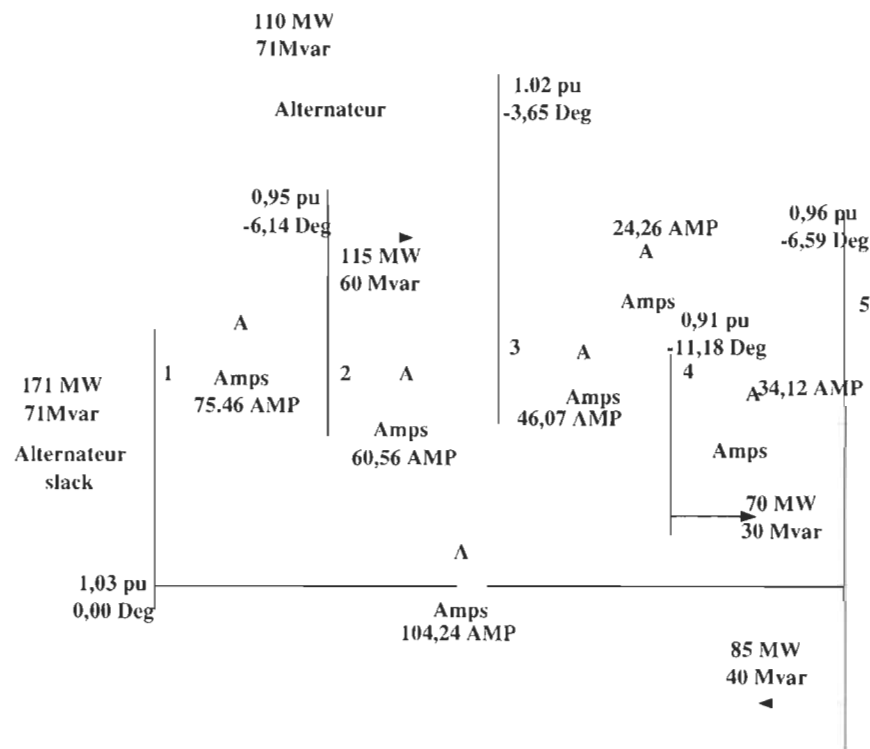


FIGURE 1 – Schéma unifilaire de réseau sous le logiciel Power Word

TABLE 1 – Réseau :

LIGNES DE TRANSMISSION				
A	⇒ B	Résistance	Inductance	Capacité
1	2	0.042	0.168	0.041
1	5	0.031	0.126	0.031
2	3	0.051	0.126	0.031
3	4	0.084	0.336	0.082
3	5	0.053	0.310	0.051
4	5	0.063	0.252	0.061

TABLE 2 – Bus PQVD :

BUS PVQD				
Jeux de Barre	P	Q	V	D
	Puissance Active	Puissance Réactive	Amplitude de la Tension	Angle de la Tension
1	0	0	1.03	0
2	-1.15	-0.6	1.00	0
3	1.10	0	1.02	0
4	-0.7	-0.3	1.00	0
5	-0.85	-0.4	1.00	0

Résolution : Code source (Matlab)

```
clear
clc
data
calcy
delta=1
inr=0
igs=0
l=size(PQVD,1)
g=1
h=1

for j=1:l
    V(j)=PQVD(j,4)
    P(j)=PQVD(j,2)
    Q(j)=PQVD(j,3)
    V(j)=PQVD(j,4)
end

% Detection des type de jeux de barres

for j=1:l
    if ((P(j)==0)&(Q(j)==0))
        swing=PQVD(j,1)
    elseif ((V(j)~=1)&(Q(j)==0))
        generator(g)=PQVD(j,1)
        g=g+1
    end
end
```

```
        else
            load(h)=PQVD(j,1)
            h=h+1
        end
    end
end

Qgs=Q
Vgs=V

%***** Calcul iteratif de Gauss Seidel *****

epsilon=0.0000001
Vancien(1:1)=10
Vnouveau(1:1)=0

while max(abs(Vnouveau-Vancien))>epsilon
    for j=2:1
        % recherche automatique du type de BUS
        for p=1:length(load)
            if load(p)==j
                type=1
            end
        end
        for p=1:length(generator)
            if generator(p)==j
                type=2
            end
        end
    end
end
```

```
end
% aiguillage selon le type
sigma=0
for k=1:l
    if k~=j
        sigma=sigma+(Vgs(k)*Y(j,k))
    end
end
Vgsancien(j)=Vgs(j)
switch type
    case 1
        for p=1:2

            Vgsancien(j)=Vgs(j)

            Vgs(j)=(1/Y(j,j))*((((P(j)-i*Qgs(j))/conj(Vgs(j)))+sigma))

            Vgs(j)=Vgsancien(j)+delta*(Vgs(j)-Vgsancien(j))

        end
    case 2
        for p=1:2

            Vgsancien(j)=Vgs(j)

            Qgs(j)=-imag(((Y(j,j)*Vgs(j))-sigma)*conj(Vgs(j)))
            Vgs(j)=(1/Y(j,j))*((((P(j)-i*Qgs(j))/conj(Vgs(j)))+sigma))
```

```
Vgs(j)=Vgsancien(j)+delta*(Vgs(j)-Vgsancien(j))

% correction
Vgs(j)=(Vgs(j)*PQVD(j,4))/abs(Vgs(j))
end
end
end
Vancien=Vnouveau
Vnouveau=Vgs
igs=igs+1
Vgsevol(igs,1:length(Vgs))=abs(Vgs)
end

%***** Methode Newton Raphson *****

% Calcul des matrices constantes

G=real(Y)
B=-imag(Y)

Bprime=B(2:1,2:1)
for s=1:length(Bprime)
    if s==generator-1
        Bsecond=Bprime(1:s-1,1:s-1)
        Bsecond(s:length(Bprime)-1,s:length(Bprime)-1) =
Bprime(s+1:length(Bprime),s+1:length(Bprime))
```

```
Bsecond(1:s-1,s:length(Bprime)-1)=Bprime(1:s-1,s+1:length(Bprime))
Bsecond(s:length(Bprime)-1,1:s-1)=Bprime(s+1:length(Bprime),1:s-1)
end
end
for j=1:length(Bprime)
    for k=1:length(Bprime)
        if j~=k
            Bprime(j,k)=-Bprime(j,k)
        end
    end
end
end
for j=1:length(Bsecond)
    for k=1:length(Bsecond)
        if j~=k
            Bsecond(j,k)=-Bsecond(j,k)
        end
    end
end
end

Vnr=V
Qnr=0
phi(1:l-1,1)=0

deltaPancien(1:l-1)=0
deltaPnouveau(1:l-1)=10

% Boucle iterative
```

```
while max(abs(deltaPnouveau-deltaPancien))>epsilon

% Calcul des puissances

a(1)=Vnr(1)
b(1)=0
for s=2:l
    a(s)=Vnr(s)*cos(phi(s-1))
    b(s)=Vnr(s)*sin(phi(s-1))
end
for k=2:l
    sommep=0
    sommeq=0
    for s=1:l
        if s~=k
            sommep = sommep + (a(k)*(a(s)*G(k,s)+b(s)*B(k,s)))
            + (b(k)*(b(s)*G(k,s)-a(s)*B(k,s)))
            sommeq = sommeq + (b(k)*(a(s)*G(k,s)+b(s)*B(k,s)))
            - (a(k)*(b(s)*G(k,s)-a(s)*B(k,s)))
        end
    end
    Pnr(k-1)=((a(k).^2)+(b(k).^2))*G(k,k)-sommep
    if k~=generator
        Qnr(k-1)=((a(k).^2)+(b(k).^2))*B(k,k)-sommeq
    end
end
end
```

```
deltaPnr=P(2:l)-Pnr
deltaQnr=Q(2:l)-Qnr

% Calculs des corrections a apporter

for s=1:l-1
    deltapv(s,1)=deltaPnr(s)/Vnr(s+1)
end
deltaphi=inv(Bprime)*deltapv
phi=phi+deltaphi
q=1
for s=1:l-1
    if s~=generator-1
        deltaqv(q,1)=deltaQnr(s)/Vnr(s+1)
        q=q+1
    end
end
deltaVnr=inv(Bsecond)*deltaqv
q=1
for s=2:l
    if s~=generator
        Vnr(s)=Vnr(s)+deltaVnr(q)
        q=q+1
    end
end
deltaPancien=deltaPnouveau
deltaPnouveau=deltaPnr
```

```
        inr=inr+1
end

% rearrangement de phi
phi(2:length(phi)+1)=phi
phi(1)=0
phi=phi.'

% rearrangement de Vnr en complexe
for k=1:length(Vnr)
    Vnr(k)=Vnr(k)*exp(i*phi(k))
end

%***** Calculs des puissances dans les lignes *****

for k=0:size(L,1)-1
    PQI((2*k)+1,1)=L(k+1,1)
    PQI((2*k)+1,2)=L(k+1,2)
    PQI((2*k)+2,1)=L(k+1,2)
    PQI((2*k)+2,2)=L(k+1,1)
end

for k=0:size(L,1)-1
    x=PQI((2*k)+1,1)
    y=PQI((2*k)+1,2)
    Yij=inv(L(k+1,3)+i*L(k+1,4))
    Yii=i*L(k+1,5)/2
```



```
S=((conj(Yii)+conj(Yij))*(abs(Vgs(x)).^2))-(conj(Yij)*Vgs(x)*conj(Vgs(y)))
PQI((2*k)+1,3)=real(S)
PQI((2*k)+1,4)=imag(S)
PQI((2*k)+1,5)=conj(S)/conj(Vgs(x))
S=((conj(Yii)+conj(Yij))*(abs(Vgs(y)).^2))-(conj(Yij)*Vgs(y)*conj(Vgs(x)))
PQI((2*k)+2,3)=real(S)
PQI((2*k)+2,4)=imag(S)
PQI((2*k)+2,5)=conj(S)/conj(Vgs(y))
end

% ***** Affichage des resultats *****

fprintf('\n*****')
fprintf('\n***** tension aux jeux de barres *****')
fprintf('\n*****')
fprintf('\n\n *** Methode de Gauss Seidel ***')
for k=1:length(Vgs)
fprintf('\n\n Au jeu n %d : V = %f pu , phi = %f degre',k,abs(Vgs(k)),
angle(Vgs(k))*180/pi)
end
fprintf('\n\n %d iterations ont ete necessaire',igs)
fprintf('\n\n *** Methode de Newton Raphson ***')
for k=1:length(Vnr)
fprintf('\n\n Au jeu n %d : V = %f pu , phi = %f degre',k,abs(Vnr(k)),
angle(Vnr(k))*180/pi)
end
```

```
fprintf('\n\n %d iterations ont ete necessaire',inr)
fprintf('\n\n\n*****')
fprintf('\n**** Bilan des puissances sur les lignes ****')
fprintf('\n*****')
for k=1:size(PQI,1)
fprintf('\n\nDu jeu %d vers le jeu %d :',PQI(k,1),PQI(k,2))
fprintf('\n\nP=%f pu\nQ=%f pu\nI=%f pu\nphi=%f degre',PQI(k,3),
PQI(k,4),abs(PQI(k,5)),angle(PQI(k,5))*180/pi)
if PQI(k,3)>0
    fprintf('\nles puissances sont injectees')
else
    fprintf('\nles puissances sont absorbees')
end
end
fprintf('\n\n\n*****')
fprintf('\n** Bilan des puissances sur les jeux de barres **')
fprintf('\n*****')
for k=1:size(PQVD,1)
    fprintf('\n\nsur le jeu de barres n %d : ',k)
    P=0;
    Q=0;
    for h=1:size(PQI,1)
        if PQI(h,1)==k
            P=P+PQI(h,3);
            Q=Q+PQI(h,4);
        end
    end
end
```

```
fprintf('\n\nP=%f, Q=%f',P,Q)
end
```

.2 Norme IEEE Standard 519

Initialement rédigée en 1981 pour donner des directives par rapport à l'usage des charges non linéaires sources d'harmoniques comme les convertisseurs statiques, cette norme contribuait alors essentiellement à maintenir une qualité de l'onde acceptable (cf. Tableaux 3 et 4). Ces dernières années, avec la croissance des recherches en électronique de puissance, elle est désormais une plate forme qui spécifie les limites à ne pas dépasser dans la génération des harmoniques, à l'usage des ingénieurs et autres spécialistes.

TABLE 3 – Limites de Distorsions de Tension

Niveau de Tension	Taux de Distorsion Individuel de Tension (%)	Taux de Distorsion Global de Tension (%)
≤ 69 KV	3.0	5.0
≥ 69.001 KV et ≤ 161 KV	1.5	2.5
≥ 161.001 KV	1.0	1.5

.3 Critères sur les Filtres Anti-Harmoniques (Typique à Schneider Electric)

Dans le but d'apporter une stabilité fiable des installations électriques, il existe des critères émis par des spécialistes dans le choix du filtre à adopter (cf. Tableau 5).

.3 Critères sur les Filtres Anti-Harmoniques (Typique à Schneider Electric)94

TABLE 4 – Limites de Distorsion de Courants Harmoniques

Distorsion Maximale du Courant Harmonique en Pourcentage de I_L						
Ordre harmonique individuel (harmoniques impairs)						
I_{SC}/I_L	11	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h$	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
I_L : demande maximale du courant de charge. I_{SC} : courant de court-circuit maximal. TDD : taux de distorsion global du courant. Les harmoniques pairs sont limités à 25% des limites des harmoniques impairs dans le tableau 4.						

TABLE 5 – Critères sur les Filtres Harmoniques

Type d'Application	Filtre Passif	Filtre Actif	Filtre Hybride
Bâtiment tertiaire (informatique, climatisation, éclairage, ascenseurs)	□	□□□	□□
Industrie papier, carton, plastique (convoyage, enrouleurs, dérouleurs)	□□□	□	□□
Industrie traitement de l'eau (pompage, brassage)	□□	□□□	□□□
Manutention (levage, remontées mécaniques)	□□	□	□□□

Légende :

□□□ Totalemt adapté

□□ Totalemt adapté techniquement, mais économiquement non optimisée

□ Solution satisfaisante

.3 Critères sur les Filtres Anti-Harmoniques (Typique à Schneider Electric)95

Le Filtre Passif : Il présente le double avantage de compensation d'énergie réactive et une grande capacité de filtrage en courant. Cependant l'installation où est placé le filtre doit présenter une stabilité suffisante, avec peu de fluctuation de charge. Si la puissance réactive fournie est importante, il est conseillé de mettre hors tension le filtre passif pendant les périodes de faible charge. D'autre part, l'étude de raccordement d'un filtre doit tenir compte de la présence éventuelle d'une batterie de compensation et peut conduire à sa suppression.

Le Filtre Actif : Il offre une possibilité de filtrage des harmoniques sur une large bande de fréquence, et peut s'adapter à n'importe quelle charge. Cependant, sa puissance harmonique est limitée.

Le Filtre Hybride : De son côté, il se présente comme étant une réunification des performances des deux filtres précédemment cités.

En fonction de l'application en vue, on peut dresser le tableau sélectif 5.